

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Construção de uma estação portátil de baixo custo para medição das concentrações de O₃ e NO₂

Tiago Filipe da Silva Avelino

Mestrado Integrado em Engenharia de Energia e Ambiente

Dissertação orientada por:
Prof Dr. Carla Silva

2019

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à CCDR-Lisboa todo o apoio dado para a elaboração desta dissertação, desde a visita à estação de Entrecampos, a colocação do protótipo na estação e a disponibilização dos dados.

À Professora Doutora Carla Silva pela sua orientação, total apoio e disponibilidade.

Ao Ângelo Soares por toda a paciência que teve e estar sempre disponível para me ajudar sempre que tinha dúvidas relativamente ao funcionamento dos sensores e na escrita do código.

À minha família e aos meus amigos por terem estado sempre ao meu lado e apoiado em todos os momentos desta dissertação.

Os maiores agradecimentos vão para a minha inspiração, Maria Gabriela Silva, pelo amor e apoio incondicional especialmente nos momentos mais difíceis.

Resumo

A qualidade do ar nas áreas urbanas é uma grande preocupação nas cidades modernas devido aos impactos significativos da poluição do ar na saúde pública, no ambiente global e na economia mundial. Actualmente já existem redes de monitorização da qualidade do ar implementadas nas grandes cidades a nível mundial, através de estações fixas que possuem analisadores de gases e partículas bastante robustos, mas estas informações referem-se ao local onde se encontra a estação, existindo assim uma restrição espacial, por exemplo na cidade de Lisboa existem 6 estações numa área com 100 km², isso dá 0,06 estações por km², além de que estas estações são extremamente caras, consideradas *high cost*. Com estas limitações a monitorização da poluição do ar numa área mais ampla não é viável, a solução ideal é aumentar o número de estações por km² para cobrir mais área. Contudo actualmente recorre-se ao uso de sensores modernos de baixo custo e portáteis que cria oportunidades de recolher dados em zonas onde não existe controlo da qualidade do ar por parte das redes de monitorização e fornecer um mapa detalhado da poluição do ar. É então nesta linha de pensamento que se insere esta dissertação, que procura obter as informações quantitativas das concentrações dos gases poluentes em qualquer lugar usando um protótipo *low cost*, para os gases O₃ (ozono de baixa altitude) e NO₂ (um dos precursores do O₃).

A dissertação centra-se em dois objectivos, a construção de uma estação de qualidade do ar de baixo custo e acima de tudo que seja portátil, e por fim o teste da mesma no local de uma estação *high cost*. O protótipo final consiste numa placa de Arduino que serve de interface entre o computador e os sensores utilizados, DHT22, MQ-131 e o MICS-4514, em que mede a temperatura ambiente (T), a humidade relativa (HR) e as emissões de ozono (O₃) e dióxido de azoto (NO₂). Ao longo da dissertação serão disponibilizadas as informações para que qualquer pessoa consiga construir uma estação *low cost* e portátil de monitorização de qualidade do ar. O preço de todos os componentes que integram o protótipo é de 92 €, e a caixa tem um peso inferior a 1 kg.

Para se testar o funcionamento da estação já construída, colocou-se o protótipo numa estação de referência nacional da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo, situada na rotunda de Entrecampos, Lisboa, para ser feito uma comparação dos sensores *low cost* (menos de 500 €) vs. *high cost* (mais de 10000 €). A campanha de monitorização durou cerca de 1 semana e meia, onde cerca de 864 dados foram comparados.

Os resultados finais indicam que os sensores não são adequados para substituir uma estação *high cost*, mas poderão ser utilizados para realizar medições rudimentares, isto é, são bons o suficiente para indicar se existe um aumento ou uma diminuição da concentração dos gases poluentes em estudo.

Palavras chaves: Monitorização da qualidade do ar, Poluição, Sensores electroquímicos, Estação de referência Entrecampos.

Abstract

Air quality in urban areas is a major concern in modern cities due to the significant impacts of air pollution on public health, the global environment and the world economy. There are currently air quality monitoring networks implemented in large cities worldwide, through fixed stations that have very robust gas and particle analyzers, but this information refers to where finds the station, thus having a spatial restriction, for example in the city of Lisbon there are 6 stations in an area with 100 km², this gives 0.06 stations per km², besides that these stations are extremely expensive, considered high cost. With these limitations monitoring air pollution in a wider area is not feasible, the ideal solution is to increase the number of stations per km² to cover more area. However, the use of modern low-cost and portable sensors is currently used that creates opportunities to collect data in areas where there is no control of air quality by monitoring networks and provide a detailed map of air pollution. then in this line of thought that this dissertation is inserted, which seeks to obtain quantitative information of the concentrations of polluting gases anywhere using a low-cost prototype, for gases O₃ (low altitude ozone) and NO₂ (one of the O₃ precursors).

The dissertation focuses on two objectives, the construction of a low-cost air quality station and above all that is portable, and ultimately the test of it on site of a high cost station. The final prototype consists of an Arduino plate that serves as an interface between the computer and the sensors used, DHT22, MQ-131 and mics-4514, in which it measures room temperature (T), relative humidity (HR) and ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂) emissions. Throughout the dissertation will be available the information so that anyone can build a low cost and portable air quality monitoring station. The price of all components that integrate the prototype is 92 €, and the box has a weight less than 1 kg.

To test the operation of the station already built, the prototype was placed in a national reference station of the Regional Coordination and Development Commission of Lisbon and Tagus Valley, located at the roundabout of Entrecampos, Lisbon, to be made a comparison of low cost sensors (less than 500 €) vs. high cost (more than €1,000). The monitoring campaign lasted about 1 and a half weeks, where about 864 data were compared.

The final results indicate that the sensors are not suitable to replace a high cost station, but can be used to perform rudimentary measurements, that is, they are good enough to indicate whether there is an increase or decrease in concentration of the polluting gases under study.

Keywords: Air quality monitoring, Pollution, Electrochemical sensors, Reference Station Entrecampos.

Conteúdo

Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da Tese	2
Conceitos e Revisão Bibliográfica	3
2.1 Sistema de Sensores	3
2.2 Monitorização da Qualidade do Ar	3
2.2.1 Sistemas estacionários	4
2.2.2 Sistemas portáteis	5
2.3 Variáveis em Estudo	6
2.3.1 Ozono	6
2.3.2 Dióxido de Azoto	6
2.3.3 Temperatura e Humidade Relativa	7
2.4 Legislação da poluição do ar	7
2.5 Sensores Semicondutores	9
Métodos	10
3.1 Componentes do protótipo	10
3.1.1 Placa Arduíno	10
3.1.2 Sensor de Ozono	11
3.1.3 Sensor de Dióxido de Azoto	12
3.1.4 Sensor de Temperatura e Humidade	13
3.1.5 Real Time Clock	14
3.1.6 SD Card Shield V3.0	14
3.1.7 Regulador de Tensão LM2596S	15
3.2 Comunicação <i>Hardware-Software</i>	15
3.2.1 Hardware	15
3.2.2 <i>Software</i>	17
3.3 Construção da Estação de Qualidade do Ar	17
3.3.1 Pré-Montagem	17
3.3.1.1 Sensor DHT 22	17
3.3.1.2 Sensor MQ-131	18

3.3.1.3 Sensor MICS-4514	20
3.3.1.4 Construção caixa	20
3.3.2 Montagem	21
3.4 Análise de Consumo	23
3.5 Análise de Custos.....	24
3.6 Estação de monitorização de Entrecampos	24
Resultados	26
4.1 Resultados Preliminares	26
4.2 Resultados com estação de Entrecampos.....	28
4.2.1 MQ -131.....	28
4.2.2 MICS-4514	35
Conclusões.....	39
Anexos	41
Anexo A	41
Anexo B.....	44
Referências	59

Lista de Figuras

Figura 1: Imagem da Estação de Monitorização da Qualidade do Ar em Entrecampos, da CCD RLVT .	4
Figura 2: Imagem de uma estação de monitorização de qualidade do ar portátil.....	5
Figura 3: Influência da temperatura e humidade relativa na relação de resistências do sensor MQ-131 - [25]	7
Figura 4: Sensor típico semiconductor de óxidos metálico - [18]	9
Figura 5: Arduino Uno	10
Figura 6: Sensor MQ-131	11
Figura 7: Imagem do sensor MICS-4514	12
Figura 8: Sensor DHT22	13
Figura 9: Real Time Clock	14
Figura 10: SD Card Shield V3.0	14
Figura 11: Regulador de Tensão LM2596S	15
Figura 12: Layout dos terminais do Arduino	16
Figura 13: Código do sensor DHT22	18
Figura 14: Código do Sensor MQ-131	19
Figura 15: Ligação do sensor MQ-131 [22].....	19
Figura 16: Código do Sensor MICS-4514.....	20
Figura 17: Caixa do Protótipo	21
Figura 18: Esquema final das ligações do protótipo.....	22
Figura 19: Caixa do protótipo completa.....	22
Figura 20: Limites de corrente e tensão do Arduino	23
Figura 21: Implementação do protótipo na estação de referência nacional da CCDR LVT - Entrecampos	25
Figura 22: Primeiro teste dos sensores MQ-131 e MICS-4514.....	26
Figura 23: Teste dos sensores MQ-131 e MICS-4514	27
Figura 24: Medição de Ozono - Dia 28 de Agosto.....	28
Figura 25: Medição de Temperatura e Humidade Sensor DHT22 - Dia 28 de Agosto.....	30
Figura 26: Correlação valores instantâneos de Ozono - Sensor (1)	30
Figura 27: Correlação valores instantâneos de Ozono - Sensor (2)	31
Figura 28: Valores médios diários de Ozono	32
Figura 29: Correlação valores médios diários Ozono - Sensor (1).....	33
Figura 30: Correlação valores médios diários Ozono - Sensor (2).....	33
Figura 31: Correlação Média 8 Horas de Ozono - Sensor (1)	34
Figura 32: Correlação Média 8 Horas de Ozono - Sensor (2)	34
Figura 33: Medições Dióxido de Azoto - Dia 28 Agosto.....	35
Figura 34: Correlação valores instantâneos de Dióxido de Azoto	36
Figura 35: Valores diários médios de Dióxido de Azoto	36
Figura 36: Correlação Média Diárias Dióxido de Azoto.....	37

Lista de Tabelas

Tabela 1: Classificação do índice de qualidade do ar (2019) - [4]	3
Tabela 2: Valores limite de exposição dos gases poluentes - [14]	8
Tabela 3: Valores alvo, de informação e alerta à população de Ozono em Portugal - [15]	8
Tabela 4: Valores limite e de alerta à população de Dióxido de Azoto em Portugal - [15]	8
Tabela 5: Características do MQ131, Sensor de O ₃	11
Tabela 6: Características do MICS-4514, Sensor de NO ₂	12
Tabela 7: Características do DHT22, Sensor de Temperatura e Humidade	13
Tabela 8: Consumo dos componentes do protótipo	23
Tabela 9: Custo dos componentes do protótipo	24
Tabela 10: Custo dos Equipamentos da estação de Entrecampos	25

Abreviaturas e Símbolos

NO ₂	Dióxido de Azoto
O ₃	Ozono
RH	Humidade relativa
T	Temperatura
OMS	Organização Mundial de Saúde
CCDR LVT	Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo
US.EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
MOS	<i>Metal Oxide Semiconductor</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
DC	<i>Direct Current</i>
V _{in}	<i>Input Voltage</i>
GND	<i>Ground</i>
VCC	<i>Voltage Common Collector</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
RL	<i>Resistance Load</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Um ar limpo é essencial para a nossa saúde e para o ambiente. Mas desde a revolução industrial, a qualidade do ar que nós respiramos tem vindo a deteriorar-se consideravelmente, com o uso do carvão e outros combustíveis fósseis para aquecimento, iluminação, alimentação de motores de combustão interna e na indústria contribuíram para o lançamento de produtos indesejados para a atmosfera de efeito global, dióxido de carbono (CO₂), e de efeito local tais como, o dióxido de azoto (NO₂), monóxido de azoto (NO) e ozono (O₃). Estes poluentes tanto podem ter origem natural, como vulcões e incêndios florestais ou origem antropogénica, sendo esta em maior escala que a de origens naturais e pode levar a efeitos negativos na saúde da população, principalmente problemas no sistema respiratório e cardiovascular, e ainda poluir o ar [1]. Um dos casos mais severos de poluição do ar a larga escala aconteceu no ano de 1952 em Londres, ficando conhecido por “*The Great Smog of 1952*”. A principal causa de poluição deste fenómeno foi atribuída à revolução industrial, a queima incontrolada de combustíveis fósseis, carvão, na indústria, transportes e aquecimento em casa. Levou à morte de 12.000 pessoas nos meses que sucederam. A maioria das vítimas eram crianças bastante novas, idosos e pessoas com problemas respiratórios pré-existent. Foi também o caso mais significativo em termos de consciencialização dos efeitos que a qualidade do ar tem na saúde, levando a mudanças drásticas nas práticas e regulamentos [2].

Apesar de todo o avanço científico que vai acontecendo aliado à mudança de mentalidade e consciencialização do homem sobre os efeitos negativos da poluição do ar, actualmente a poluição do ar ainda é um dos maiores problemas a nível ambiental e de saúde pública que afecta tanto os países subdesenvolvidos como os países mais avançados. De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), estima-se que a poluição do ar exterior em áreas urbanas e rurais é a causa de 4.2 milhões de mortes a nível mundial por ano. Em ambientes interiores, devido a processos de combustão cerca de 3.8 milhões de pessoas morrem [3].

Com o contínuo crescimento de população nos centros urbanos e por conseguinte o aumento dos meios de transporte e outros processos que requerem combustão, as emissões de gases poluentes para a atmosfera continuam a existir em larga escala e é então preciso monitorizar e alertar a população sobre a qualidade do ar que respiram diariamente. Esta monitorização já está implementada em grandes cidades mundiais através de redes de monitorização fixas, que possuem métodos bastante precisos nas medições da qualidade do ar, contudo a informação sobre a qualidade do ar é bastante localizada ao redor da estação e estas são consideradas *high cost*, relativamente aos aparelhos usados sua calibração e manutenção. Como alternativa a estas estações fixas de elevado custo, tem-se estudado o potencial de sensores *low cost* e o facto de poder ser uma estação portátil de maneira a poder analisar a qualidade do ar em locais que não se verifique a existência de estações de monitorização estacionárias.

1.2 Objectivos

O objectivo desta tese é construir e testar uma estação de medição de qualidade do ar *low-cost*, com base em sensores electroquímicos, com uma estação de referência nacional da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR LVT). Os parâmetros de interesse são temperatura, humidade, emissão de O₃ e emissão de NO₂.

Os custos serão também comparados.

1.3 Estrutura da Tese

A dissertação está dividida em cinco capítulos, indo desde o enquadramento (capítulo 1) até à construção (capítulo 3) e realização de testes de uma estação de monitorização portátil da qualidade do ar exterior (capítulo 4). No capítulo 2 são apresentados alguns conceitos relacionados com o tema, incluindo os limites de concentração de poluentes indicados nos limites legais de qualidade do ar, e é feita uma revisão bibliográfica sobre outros sistemas de sensores utilizados na monitorização da qualidade do ar. Por último, a discussão dos resultados obtidos é apresentada no capítulo 5.

Capítulo 2

Conceitos e Revisão Bibliográfica

2.1 Sistema de Sensores

Um sistema de sensores é um dispositivo que integra um ou mais sensores, juntamente com outros componentes de maneira a detectar e responder a qualquer tipo de mudança que aconteça. Geralmente o resultado é um sinal que é convertido num valor analógico para um monitor ligado ao sistema ou transmitido electronicamente através de uma rede *wireless*.

2.2 Monitorização da Qualidade do Ar

Nas áreas urbanas a monitorização da qualidade do ar consiste em estações de monitorização instaladas em contentores. Estes contentores são de grandes dimensões, para que possam comportar os instrumentos necessários à medida dos gases a serem monitorizados e equipamento necessário para o bom funcionamento da estação, esta é fixa e geralmente têm um custo de construção elevado, requerem manutenção e processos de calibração que apenas podem ser realizados por pessoas qualificadas. A vantagem destas estações em comparação com estações portáteis é que os métodos usados são muito mais precisos e selectivos na medição dos diferentes poluentes.

Para se poder fazer uma classificação simples e compreensível do estado da qualidade do ar foi criado um índice de qualidade do ar, que vai variando anualmente para corresponder aos valores limites impostos na legislação. O índice varia de mau a muito bom para cada poluente de acordo com a tabela 1 e fazendo uma média aritmética calculada para cada um dos poluentes medidos em todas as estações da rede dessa área obtém-se o índice de qualidade do ar para uma determinada área.

Tabela 1: Classificação do índice de qualidade do ar (2019) - [4]

Poluente / Classificação	O₃ (µg/m³)	NO₂ (µg/m³)	SO₂ (µg/m³)	PM10	PM2.5
Muito Bom	0-80	0-40	0-100	0-20	0-10
Bom	81-100	41-100	101-200	21-35	11-20
Médio	101-180	101-200	201-350	36-50	21-25
Fraco	181-240	201-400	351-500	51-100	26-50
Mau	241-600	401-1000	501-1250	101-1200	51-800

2.2.1 Sistemas estacionários

De acordo com a Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR LVT) [5] existe actualmente uma rede de monitorização da qualidade do ar, constituída por 23 estações, distribuídas pelas 4 zonas da região de Lisboa e Vale do Tejo. Enquanto na cidade de Lisboa existem 6 estações, sendo que Lisboa tem uma área de 100 km², isto corresponde a 0.06 estações/km².

Estas estações estão instaladas em diferentes tipos de zona, as rurais, suburbanas e as urbanas e em cada zona a estação é diferente para uma melhor monitorização da qualidade do ar, sendo então classificadas como estação de tráfego, industriais e de fundo. As estações de tráfego estão localizadas perto das vias de trânsito e permitem uma avaliação mais detalhada sobre o risco máximo de exposição da população às emissões produzidas pelos veículos. As estações industriais estão instaladas perto de parques industriais e dão a conhecer as concentrações máximas de certos poluentes aos quais a população pode estar exposta. Por fim as estações de fundo, ao contrário das anteriores não estão colocadas sobre nenhuma influência directa de qualquer fonte de emissões, permitindo assim conhecer a exposição da população aos fenómenos de poluição de fundo.

As substâncias poluentes monitorizadas pelas estações são o monóxido de carbono, óxidos de azoto, dióxido de enxofre, ozono, partículas PM₁₀ e PM_{2.5} e benzeno. As estações estão equipadas com um conjunto de analisadores que medem em contínuo e de forma automática os poluentes existentes na atmosfera. Os métodos usados para medir cada poluente são a quimiluminescência para os óxidos de azoto, absorção de infravermelhos na medição de monóxido de carbono, fotometria ultravioleta para o ozono, a atenuação de radiação β é usada na medição das partículas e a cromatografia em fase gasosa para o benzeno. Conseguem produzir os dados em tempo real, isto é, estão sempre a analisar o ar e a produzir uma leitura instantânea. Esta leitura pode ser feita na base de dados nacional sobre a qualidade do ar, QualAr [6] sob a forma de concentrações médias horárias e de um índice de qualidade do ar para as diversas estações de monitorização na região de Lisboa e Vale do Tejo, esta informação é actualizada constantemente durante o dia de maneira a oferecer leituras em tempo real.



Figura 1: Imagem da Estação de Monitorização da Qualidade do Ar em Entrecampos, da CCD RLVT

2.2.2 Sistemas portáteis

No estudo de P. Völgyesi *etal* [7] é construído um protótipo móvel de monitorização da qualidade do ar, de baixo custo e instalado num carro de maneira a cobrir mais área quando comparado com as estações de monitorização estacionárias já existentes na cidade de Nashville nos Estados Unidos da América. O protótipo consiste num microcontrolador, um sistema de GPS de maneira a fornecer informação sobre o local e a hora, e um conjunto de sensores para a medição de vários gases poluentes, tais como, ozono, monóxido de carbono e dióxido de azoto. É usado também um sensor para registar a temperatura e humidade durante o projecto. Através de uma ligação Bluetooth os dados são enviados para o computador para depois serem carregados para o portal da SensorMap, dando origem a um mapa detalhado sobre a qualidade do ar, com um sistema low cost.

Em D. Hasenfratz *etal* [8] foi introduzido um sistema portátil, de baixo consumo de energia e de baixo custo para monitorização da poluição do ar, chamado GasMobile. O sistema é composto por um sensor de O₃ de baixo custo e pequena dimensão e um smartphone pronto a usar. O sensor comunica com o telemóvel através de uma porta USB. A localização e a hora das medições são fornecidas pelo GPS integrado no telemóvel. Posteriormente os dados são enviados para o servidor através da rede do telemóvel. A sua calibração foi feita através de estações de qualidade do ar estacionárias de alta qualidade implementadas pelas autoridades oficiais. É testado a influência da velocidade nas deslocações na precisão das leituras do sensor, mais concretamente a corrente de ar que passa pela cabeça do sensor. Conclui-se que quando se efectua medidas a baixas velocidades essa influência pode ser ignorada enquanto que a velocidades mais elevadas recomendam a utilização de uma caixa de forma a proteger a cabeça do sensor da corrente de ar.

No estudo de B. Bathiya *etal* [9] foi montado um sistema com as seguintes características, a energia consumida teria de ser o mais baixo possível, ser um sistema fechado para que a corrente de ar, e os raios solares não afectassem a sensibilidade dos sensores, ter uma rede de conexão que não falhasse durante a operação. Os sensores foram usados para receber informação da temperatura, humidade, ozono, monóxido de carbono e dióxido de azoto. A experiência foi realizada no mês de Março com a temperatura a variar entre os 25°C e os 43°C, mas é mais interessante realizar a experiência em diferentes estações do ano para estudar o comportamento dos sensores em diferentes condições, sabendo que estes sensores são sensíveis à variação da temperatura. Percebeu-se também que os sensores por vezes têm sensibilidade a outros gases afectando assim as medições e originando um valor errado para o poluente em estudo.



Figura 2: Imagem de uma estação de monitorização de qualidade do ar portátil

2.3 Variáveis em Estudo

2.3.1 Ozono

O ozono (O_3) é um gás que está presente tanto na estratosfera como na troposfera, sendo que na estratosfera é considerado um “bom” ozono em que forma uma camada protectora que protege dos raios ultravioletas vindos do sol. O “mau” ozono, formado na troposfera é considerado um poluente atmosférico devido aos seus efeitos nefastos na saúde e no ambiente, é um dos principais constituintes do smog fotoquímico. O ozono troposférico, também chamado de baixa altitude não é emitido directamente para o ar, mas sim formado através de reacções químicas entre óxidos de azoto (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (VOCs) originários de motores de combustão interna, operações industriais e vapores de gasolina, na presença de luz solar [10]. Este processo de formação faz com que os níveis mais elevados de ozono no ar ocorram em períodos de maior exposição solar e a temperaturas mais quentes. Por consequência destes factores as áreas urbanas tendem a ter altos níveis de poluição de ozono, também as áreas rurais estão sujeitas a um aumento de ozono, porque o vento pode transportar os poluentes a grandes distâncias da sua fonte original.

O ar que respiramos contém ozono, que mesmo em poucas quantidades é o suficiente para afectar a nossa saúde, podendo despoletar vários problemas de saúde, tais como, tosse, irritação na garganta, dores no peito. Concentrações mais elevadas podem ainda provocar danos nos pulmões e agravar situações de pacientes já com doenças respiratórias crónicas como a asma e compromete a aptidão que o corpo tem para combater infecções respiratórias [11].

2.3.2 Dióxido de Azoto

Os gases de oxigénio e de azoto presentes no ar não reagem entre si a temperaturas ambientes, a formação do dióxido de azoto é maioritariamente através da acção do Homem. Num motor de combustão interna, as combustões da mistura do ar com os combustíveis fósseis produzem temperaturas altas o suficiente para conduzir a reacções entre o azoto da atmosfera com o oxigénio produzido na queima, formando os óxidos de azoto (NO_x), essencialmente o monóxido de azoto (NO) e o dióxido de azoto (NO_2). Na altura da emissão, no tubo de escape dos veículos, a proporção dos gases NO_x é cerca de 90% de NO e 10% de NO_2 . Uns momentos após a sua libertação para atmosfera o NO na presença de VOCs é convertido em NO_2 [12]. Em áreas onde o tráfego automóvel é maior, como grandes cidades, a concentração de dióxido de azoto emitido para a atmosfera é significativamente maior quando comparado com uma área rural.

De acordo com a agência de protecção do ambiente dos Estados Unidos (US.EPA) a exposição a este gás mesmo em curtos períodos pode agravar doenças respiratórias, particularmente a asma. Longos períodos de exposição a concentrações mais elevadas de NO_2 pode causar o desenvolvimento de doenças respiratórias e aumentar a sensibilidade de contrair infecções respiratórias. Segundo o estudo realizado por Samoli. E et, al, existe uma correlação entre doenças respiratórias e cardiovasculares com os níveis de dióxido de azoto registados na atmosfera. As faixas etárias mais susceptíveis aos efeitos do NO_2 são as crianças e os idosos [13].

2.3.3 Temperatura e Humidade Relativa

Nesta dissertação estas duas variáveis, temperatura e humidade relativa são bastante importantes para os resultados obtidos com os sensores utilizados. As medições realizadas dependem das suas resistências internas que estão directamente relacionadas com a variação da temperatura e humidade. Através das fichas técnicas publicadas pelos fabricantes de cada sensor é possível observar o impacto da temperatura e humidade relativa no sensor. No caso do MQ-131, como podemos ver na figura 3, a variação da temperatura e humidade relativa afecta a relação de resistências do sensor que origina valores de tensão de saída diferentes.

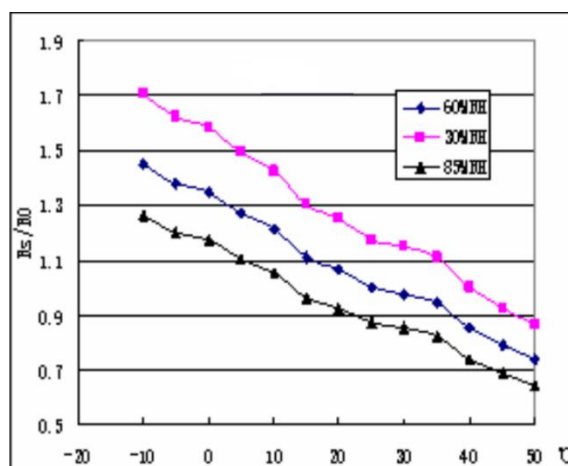


Figura 3: Influência da temperatura e humidade relativa na relação de resistências do sensor MQ-131 - [25]

2.4 Legislação da poluição do ar

A Organização Mundial da Saúde é uma agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU) que se preocupa com a saúde pública a nível internacional e tem como principal função o estabelecimento de directrizes gerais para as políticas mundiais sobre a saúde. Adota normas e padrões, acompanha e promove a aplicação das mesmas, desenvolve opções políticas, éticas e científicas relacionadas com a saúde e acompanha a situação no mundo.

Com o objectivo de definir e estabelecer normas para a qualidade do ar, a OMS publicou um relatório, “Air Quality Guidelines Global Update 2005” [14], onde expõem as directrizes em relação à qualidade do ar, como forma de prevenir e reduzir as emissões dos gases poluentes que tanto prejudicam a saúde humana como o ambiente. Este documento descreve as medidas apropriadas a adoptar de modo a atingir os objectivos propostos, apresenta também os valores de emissões dos poluentes mais comuns, ozono, dióxido de azoto, dióxido de enxofre e partículas PM_{2.5} e PM₁₀. Esses valores podem ser consultados na tabela 2.

Tabela 2: Valores limite de exposição dos gases poluentes - [14]

Gases Poluentes	Tempo de exposição	Limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Ozono	Média 8 horas	100
Dióxido de Azoto	Média 1 hora	200
Dióxido de Enxofre	Média 10 minutos	500
PM _{2.5}	Média 24 horas	25
PM ₁₀	Média 24 horas	50

Em Portugal, de modo a reduzir as emissões deste gás poluente foi assinado o Decreto-Lei nº102/2010, de 23 de Setembro [15], onde foi estabelecido um valor alvo/valor limite a atingir e valores aos quais serão emitidos alertas à população. Esses valores podem ser consultados na tabela 3 para o ozono e na tabela 4 para o dióxido de azoto.

Tabela 3: Valores alvo, de informação e alerta à população de Ozono em Portugal - [15]

Designação	Tempo de exposição	Limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Valor Alvo	Média 8 horas	120
Informação à população	Média 1 hora	180
Alerta à população	Média 1 hora	240

Tabela 4: Valores limite e de alerta à população de Dióxido de Azoto em Portugal - [15]

Designação	Tempo de exposição	Limite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Valor Limite	Média 1 hora	200
Alerta à população	Média 1 hora	400

2.5 Sensores Semicondutores

Os semicondutores de óxido metálico (MOS) são actualmente os sensores mais procurados e utilizados em diversos trabalhos. Suscitaram bastante interesse no campo de estudo de gases poluentes devido ao seu baixo custo, a sua simplicidade na utilização, serem leves, têm baixos tempos de resposta e a sua grande variedade de gases detectáveis em várias aplicações.

Os óxidos metálicos estão divididos em duas categorias, os de óxidos metálicos de transição (Fe_2O_3 , NiO , Cr_2O_3 , etc) e os óxidos metálicos de não transição que estão subdivididos em óxidos metálicos de pré transição (Al_2O_3 , etc) e os de transição posterior (ZnO , SnO_2). Os de pré transição são bastante inertes devido à sua grande bandgap, por isso são raramente escolhidos como sensores de gases devido às suas dificuldades em medições de condutividade eléctrica. Os óxidos metálicos de transição ao contrário dos de pré transição já são mais sensíveis para medições de gases, contudo são bastante limitados devido à sua instabilidade estrutural e à má optimização de outros parâmetros importantes para os sensores de gás apenas os óxidos de metal de transição com configuração electrónica d^0 e d^{10} têm potencial na medição de gases. A configuração d^0 está presente nos óxidos metálicos de transição tais como, TiO_2 , WO_3 e V_2O_5 enquanto os de transição posterior apresentam uma configuração d^{10} por exemplo o ZnO e o SnO_2 [16].

O mecanismo dos sensores semicondutores de óxido metálico baseia-se na variação de resistência após serem expostos ao gás, que está a ser estudado, devido a reacções redox entre as moléculas do gás e os iões de oxigénio (O^-) absorvidos à superfície do MOS, isto provoca uma alteração na concentração dos portadores de carga no material. Esta variação altera a condutividade do material originando assim diferenças nos valores de tensão do sensor [17]. Os sensores com um custo mais elevado estão equipados com métodos de compensação da influência da temperatura e humidade enquanto que os sensores mais baratos, utilizados nesta dissertação, não possuem esses métodos e é preciso ter em conta as curvas de características da resistência do sensor em função da concentração de gás de modo a contrariar esses efeitos e ter uma maior fiabilidade nos resultados obtidos.

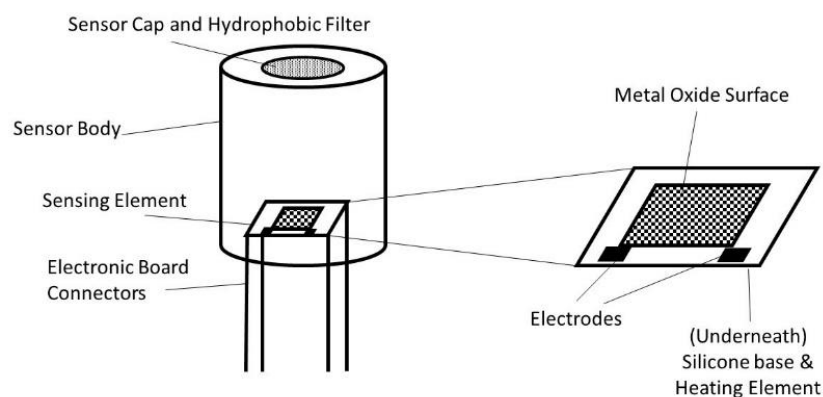


Figura 4: Sensor típico semicondutor de óxidos metálico - [18]

Capítulo 3

Métodos

3.1 Componentes do protótipo

O objectivo deste trabalho foi a criação de uma estação de monitorização da qualidade do ar. Os principais requisitos para o sistema eram de ser *low cost*, portátil e ter a capacidade de armazenar os dados de medição localmente. Outro requisito foi a implementação da data e hora nos dados obtidos.

Foi então definido que os seguintes componentes de hardware iriam ser usados e integrados num único sistema:

- Arduíno Uno
- Sensores de Gás (O₃, NO₂)
- Sensor de Humidade e Temperatura
- Módulo RTC
- Sistema de Armazenamento de Dados
- Regulador de Tensão

3.1.1 Placa Arduíno

Foi utilizado um Arduíno Uno, sendo o seu componente principal o microcontrolador Atmel Atmega328, um dispositivo de 8 bits da família AVR com arquitectura RISC avançada. Tem 32 KB de Flash, 2 KB de RAM e 1 KB de EEPROM. Possui 14 pinos que podem ser usados como entrada ou saída digitais, cada um destes operam em 5V e podem fornecer ou receber uma corrente máxima de 40mA. Para interagir com a parte analógica a placa de Arduíno possui 6 entradas onde cada uma tem a resolução de 10 bits. A placa pode ser alimentada através de um cabo USB ou por uma fonte de alimentação externa, como por exemplo um transformador que deve ter valores de tensão entre os 7V e os 12V.

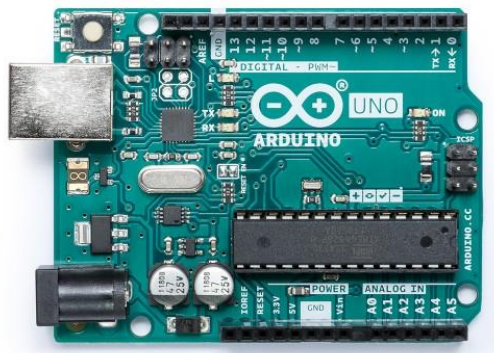


Figura 5: Arduíno Uno

3.1.2 Sensor de Ozono

O sensor de ozono, MQ131, é um semiconductor n-type de dióxido de estanho, SnO_2 , sendo um dos óxidos metálicos mais populares nos sensores semicondutores devido à sua sensibilidade ser elevada e a sua amplitude de temperatura de funcionamento ser bastante abrangente, variando desde os 25°C até aos 500°C . Devido a estas características é aconselhado um pré-aquecimento, cerca de 48 horas, através de corrente eléctrica aquecendo o sensor a uma temperatura de $300\text{--}450^\circ\text{C}$, de maneira a atingir a temperatura de operação ideal onde os iões de oxigénio, O^- são dominantes e os dados recolhidos são mais fiáveis. Este sensor é altamente sensível a ozono, mas também sensível a cloro e dióxido de azoto. [19]. O facto de ser de baixo custo, pequeno porte as características acima referidas fazem dele ideal para o projecto a desenvolver. As principais características do sensor estão presentes na tabela 5.

Tabela 5: Características do MQ131, Sensor de O_3

Características do Sensor	Valores típicos
Potência de aquecimento (P_H)	$< 900\text{mW}$
Tensão de aquecimento (V_H)	5 V
Resistência de aquecimento (R_H)	$31\ \Omega$
Amplitude da Humidade Relativa (R_H)	5 % – 95 %
Amplitude da Temperatura Ambiente (T_{amb})	$-10^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$
Amplitude de detecção de O_3 (F_s)	10 ppb – 1000 ppb



Figura 6: Sensor MQ-131

3.1.3 Sensor de Dióxido de Azoto

Também o sensor de dióxido de azoto, MICS 4514, pertence ao grupo dos semicondutores composto por óxidos metálicos. Contém dois sensores instalados no mesmo dispositivo com aquecedores independentes assim como as suas camadas de sensibilidade. Um dos sensores detecta gases oxidantes (OX) e o outro os gases redutores (RED). A resistência do sensor OX aumenta quando na presença de NO₂ enquanto que no caso do sensor RED a sua resistência diminui com a presença de CO. Segundo a sua ficha técnica, precisa de pouca energia para funcionar, é altamente sensível ao NO₂ e CO, tem uma vasta amplitude térmica assim como um grande alcance de detecção, requer um pequeno período de pré-aquecimento e é bastante resistente ao choque e vibrações. As principais características do sensor estão presentes na tabela 6.

Tabela 6: Características do MICS-4514, Sensor de NO₂

Características do Sensor	Valores típicos
Potência de aquecimento (P _H)	76mW / 43mW (Sensor RED / Sensor OX)
Tensão de aquecimento (V _H)	2.4 V / 1.7 V (Sensor RED / Sensor OX)
Resistência de aquecimento (R _H)	74 Ω / 66 Ω (Sensor RED / Sensor OX)
Amplitude da Humidade Relativa (R _H)	5 % – 95 %
Amplitude da Temperatura Ambiente (T _{amb})	-30°C – 85°C
Amplitude de detecção de NO ₂ (F _s)	50 ppb – 5000 ppb
Resistência do Sensor OX no ar (R ₀)	0.8 kΩ – 20 kΩ

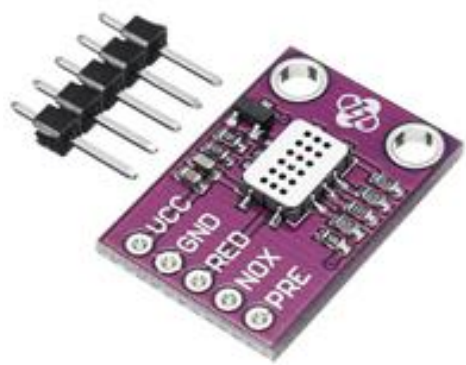


Figura 7: Imagem do sensor MICS-4514

3.1.4 Sensor de Temperatura e Humidade

Para o registo da temperatura e humidade foi utilizado o DHT22, é um sensor constituído por dois componentes. Um dos componentes, que mede a humidade, é composto por dois eléctrodos com uma placa de absorção de humidade entre eles e quando existe uma variação na humidade, isso provoca a variação da condutividade do substrato fazendo variar a resistência entre os eléctrodos. Esta mudança é medida e processada através de um circuito integrado que depois a envia a um microcontrolador para ser lida. O outro componente é um termistor NTC (Negative Temperature Coefficient), possui uma resistência interna que varia conforme a temperatura do ar. São fabricados em cerâmica ou polímero de forma à resistência sofrer maiores variações com pequenas mudanças de temperatura. Sendo um NTC, à medida que a temperatura aumenta a sua resistência decresce [18]. As principais características do sensor estão presentes na tabela 7.

Tabela 7: Características do DHT22, Sensor de Temperatura e Humidade

Características do Sensor	Valores típicos
Amplitude de operação de Humidade	0 % - 100 %
Precisão de Humidade	± 2 % RH
Resolução de Humidade	0.1 % RH
Repetibilidade de Humidade	± 1 % RH
Estabilidade de longa duração	± 0.5 % RH / ano
Amplitude de operação de Temperatura	-40 °C ~ 80 °C
Precisão de Temperatura	± 0.5 °C
Resolução de Temperatura	0.1 °C
Repetibilidade de Temperatura	± 0.2 °C
Período de Detecção	2 Segundos



Figura 8: Sensor DHT22

3.1.5 Real Time Clock

Um Real Time Clock (RTC), é utilizado de maneira a armazenar e fornecer informações completas de data como, ano, mês e dias, assim como as horas, minutos e segundos nos formatos de 12 ou 24 horas, na altura das medições. A data ao fim de cada mês é ajustada automaticamente e tem em conta os anos bissextos. O RTC usa um oscilador de cristal piezoeléctrico, geralmente feito de quartzo, criando um sinal com uma frequência precisa de 32,768 kHz mantendo assim o registo do tempo.

O modelo utilizado neste projecto é o RTC DS1307. A principal vantagem é que tem a capacidade de perceber se existe uma falha de energia e automaticamente muda a fonte de energia para uma pilha CR2032 a que está conectado. O seu pequeno tamanho, baixo custo e baixo consumo de energia são ideais para várias aplicações.



Figura 9: Real Time Clock

3.1.6 SD Card Shield V3.0

O SD Card Shield é uma placa que permite armazenar os dados recolhidos pelos sensores através de um cartão de memória SD. O SD Card Shield comunica com o arduíno por SPI, podendo ser encaixado no arduíno permitindo a utilização de todas as portas de comunicação do arduíno com excepção do pino que alimenta o SD Card Shield.



Figura 10: SD Card Shield V3.0

3.1.7 Regulador de Tensão LM2596S

O módulo regulador de tensão LM2596S trabalha como um conversor DC-DC no modo Step Down, sendo capaz de reduzir uma carga até 3A com óptima eficiência. A tensão de saída pode ser ajustada entre 1,5 V a 35 V tendo como entrada 3.2 V a 40 V. Possui uma velocidade de computação de 150 kHz e pode ser aplicado em circuitos onde a saída de um sensor é superior a 5 V, tensão de entrada máxima de uma placa de Arduino.

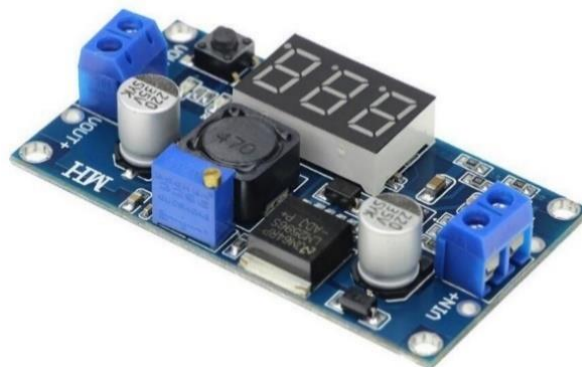


Figura 11: Regulador de Tensão LM2596S

3.2 Comunicação *Hardware-Software*

Depois de seleccionados os componentes que compõem o protótipo a construir é importante perceber o seu funcionamento e fazer a comunicação entre estes e o Arduino. O bom funcionamento é conseguido através de duas categorias, o hardware e o software, ambos dependentes um do outro. O hardware relaciona-se com as ligações físicas dos componentes à placa de Arduino enquanto que o software é numa fase posterior, já com estas ligações efectuadas e a funcionar que é então implementado um certo código para que o protótipo cumpra as tarefas que lhe estão a ser atribuídas.

3.2.1 Hardware

De maneira a fazer as ligações entre os componentes e o Arduino de forma correcta e segura, é essencial conhecer o layout dos terminais do Arduino e os seus protocolos de comunicação. Na figura 12 está representado uma placa de Arduino com os seus respectivos terminais, de seguida será explicado que terminais foram utilizados na construção física do protótipo e que protocolos de comunicação cada terminal utiliza. Toda a informação sobre o funcionamento da placa de Arduino foi retirada da página oficial do Arduino e de blogs online [19],[20].

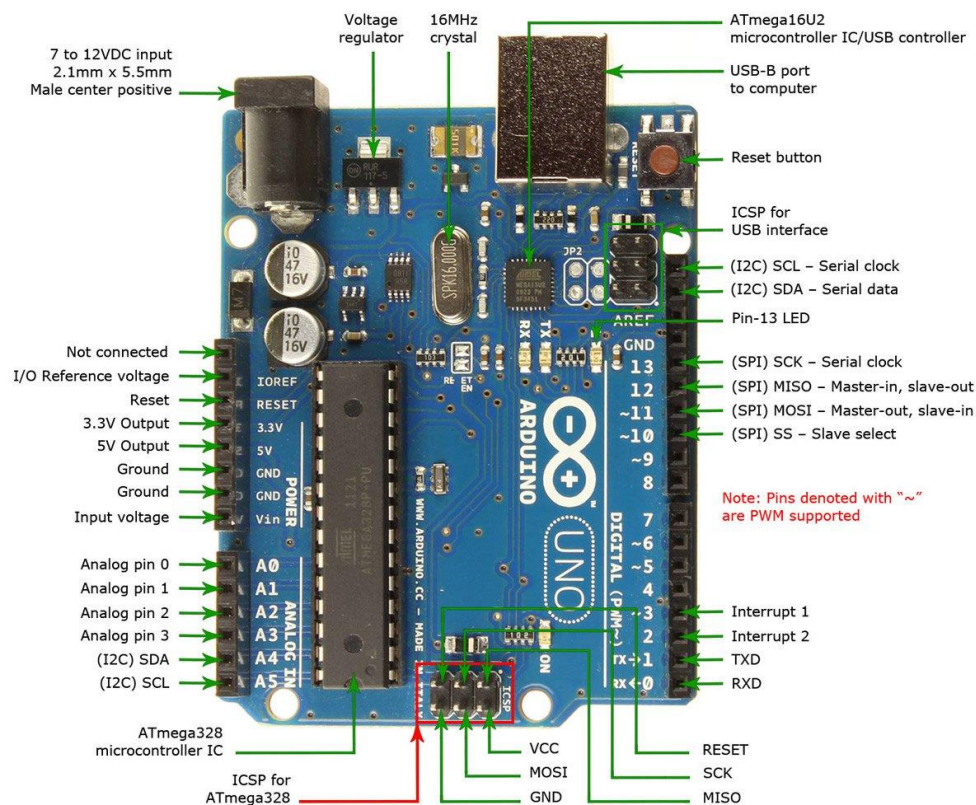


Figura 12: Layout dos terminais do Arduino

Nos terminais relativamente ao *Power*, foram usados dois pins. Utilizou-se o *Vin*, porque se usou uma fonte de alimentação externa, e não os 5V através da porta USB-B. Fornece-se a tensão de entrada à placa de Arduino através deste pino usando um conector DC. No pin do *GND* faz-se a ligação à terra de maneira a fechar o circuito.

Os terminais I/O 2 e 3, de comunicação digital, foram utilizados para ligar o sensor DHT22 e o MICS-4514.

Os terminais I/O A0, A1, A2 e A3, foram utilizados para a comunicação analógica, apesar desta comunicação ser mais lenta em comparação com a digital, tem a vantagem de poder registar valores de tensão, que são fundamentais para as medições dos sensores MQ-131 e MICS-4514. Os valores de tensão de saída do sensor são emitidos ao Arduino através de um sinal síncrono que é traduzido num valor entre 0 e 1023 *bits*. Posteriormente este valor é adaptado a um valor de tensão em volts através de uma expressão matemática implementada no código.

Os terminais I/O A4 e A5, SDA (*Serial Data Line*) e SCL (*Serial Clock Line*) respectivamente, síncronos também, são chamados de comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*), é um tipo de comunicação de dois sentidos que permite o envio de informação do computador para o componente, no nosso caso é o RTC. A informação que o computador envia constitui a data e hora na altura do registo efectuado pelo RTC que posteriormente continua a operar como se tratasse de um relógio normal. A informação fornecida servirá para implementar a data e horas nas medições realizadas pelos sensores que compõem o protótipo sempre que estes enviarem os resultados para o SD Card.

Os terminais I/O de 10 a 13 são considerados de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*). Tal como os anteriores, são também de comunicação síncrona. Possibilita também uma comunicação de dois

sentidos, e ainda permite que vários dispositivos estejam ligados ao mesmo *Master*, estabelecendo o sinal *Clock* que os dispositivos *Slave* devem seguir. Neste caso o Arduíno serve de *Master* e usou-se apenas um *Slave*, o SD Shield 3.0, que permite ao Arduíno armazenar todas as informações retiradas dos sensores num cartão de memória.

3.2.2 Software

Escrever um código de raiz requer um bom conhecimento base na área da programação, em C ou C++, para contornar este problema recorreu-se a fóruns do arduíno e ao repositório do GitHub, este último é uma plataforma de hospedagem de código-fonte permitindo aos utilizadores a divulgação e partilha dos seus trabalhos, ou para que outros utilizadores, como o nosso caso, possam retirar peças de código e modificar consoante as necessidades. Usando então o Arduíno IDE (*Integrated Development Environment*) e o Notepad++, fez-se as alterações necessárias aos códigos de maneira a estabelecer as instruções que o sistema de sensores reproduzirá.

Antes de se obter o código final utilizado para as medições, o código passou por várias fases há medida que se ia introduzindo componentes novos na placa de Arduíno, ou simplesmente fazendo modificações que permitissem que o código ficasse mais leve em termos de memória e com uma leitura mais simples. No Anexo A está presente o código final, que permite registar a informação da temperatura e humidade, assim como a medir a quantidade de O₃ e NO₂ no ar, e guardar os dados num ficheiro *Excel* criado no cartão de memória que está alojado no SD Card Shield instalado na placa de Arduíno. Estes dados são guardados com um *timestamp* produzido pelo RTC.

3.3 Construção da Estação de Qualidade do Ar

3.3.1 Pré-Montagem

Os três sensores a instalar, foram obtidos na mesma altura, mas antes de os meter todos a funcionar ao mesmo tempo, foi preciso testá-los a cada um individualmente para compreender o seu funcionamento e avaliar o desempenho dos sensores de modo a despistar qualquer erro que pudesse acontecer no futuro.

3.3.1.1 Sensor DHT 22

De modo a perceber o funcionamento deste sensor, recorreu-se ao seu *datasheet* [21] e seguiu-se as instruções de utilização descritas. É aconselhado que a alimentação seja feita entre os 3.3 e os 6 V, sendo que o valor tipicamente usado são os 5 V, por isso mesmo, nestes testes a alimentação foi feita através do computador conectado ao Arduíno utilizando os 5 V. O código utilizado foi retirado do repositório do GitHub, sendo um código específico para a utilização deste sensor não foi preciso modificá-lo. O sensor vem incorporado com os pins definidos para a tensão de alimentação (VCC), para o *ground* (GND) e o receptor digital (DATA), fazendo a sua ligação ao arduíno e correndo o código presente na figura 13 foi possível comprovar o bom funcionamento deste sensor, isto é, o sensor acompanhava as descidas e subidas de temperatura quando se provocava alterações no ambiente da sala onde o teste foi realizado.

```

// Código DHT 22 Temperatura e Humidade

#include <dht.h>

#define dataPin 2 // Define o pin ao qual o sensor está ligado
dht DHT;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int readData = DHT.read22(dataPin); // Lê a data do sensor
  float t = DHT.temperature; // Obtém o valor da Temperatura
  float h = DHT.humidity; // Obtém o valor da Humidade

  // Imprime os resultados para o monitor
  Serial.print("Temperature = ");
  Serial.print(t);
  Serial.print(" *C ");
  Serial.print("    Humidity = ");
  Serial.print(h);
  Serial.println(" % ");

  delay(2000); // Intervalo de 2s para uma nova leitura
}

```

Figura 13: Código do sensor DHT22

3.3.1.2 Sensor MQ-131

Os primeiros ensaios realizados com o MQ-131, com o módulo ainda incluído, de maneira a verificar o seu funcionamento foram bastante simples, pois o módulo com o sensor incorporado possui pins já definidos para o VCC, para o GND e o receptor analógico (Analog), tendo apenas de os ligar ao arduíno, através de cabos *jumper*. Tendo feito todas as ligações e usando o código, figura 14, com o intuito de avaliar a tensão de saída do sensor registada pelo Arduíno, verificou-se que esses valores, com uma alimentação de 5 V, eram demasiado baixos, nem chegando a 1 V. Tendo em conta que o teste foi realizado num ambiente interior fechado, uma sala com as janelas fechadas, num dia sem sol, ou seja, a presença de ozono no ar nesta situação seria mínima, perto de 0, e assim que os valores de ozono no ar subissem iria provocar o decréscimo nos valores de tensão medidos pelo sensor, chegando rapidamente a 0 V sem estar perto do verdadeiro limite inferior da amplitude de medição do sensor. Na tentativa de contrariar este resultado, tentou-se manipular a tensão de saída com o potenciómetro incluído no módulo, mas mesmo aumentando ou diminuindo a resistência, não provocava alterações nos valores registados. Deste resultado retiraram-se duas conclusões, ou a tensão de alimentação não era a correcta ou o módulo tinha algum defeito que prejudicasse o seu bom funcionamento. Concluiu-se que o potenciómetro estava danificado pois por mais que se tentasse aumentar ou diminuir a resistência, nada acontecia.

```

// Código utilizado para medir valor de tensão do sensor

const int gasSensor = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  float voltage;
  voltage = getVoltage(gasSensor);

  Serial.println(voltage); // imprime o valor de tensão no monitor
  delay(1000); // intervalo de 1 segundo para uma nova medida
}

float getVoltage(int pin)
{
  return (analogRead(A0) * 0.004882814);
  // Converte o valor analógico entre 0 e 1023, para um valor de tensão entre 0 e 5 V
}

```

Figura 14: Código do Sensor MQ-131

Com base na conclusão anterior e de maneira a despistar futuros problemas foi então decidido retirar o sensor do módulo e prosseguir apenas com o sensor e, recorrendo à informação disponibilizada no website do Arduino na secção dos sensores MQ [22] e ao seu *datasheet* [23] foi possível encontrar o seguinte esquema para se fazer a ligação correcta do sensor ao Arduino.

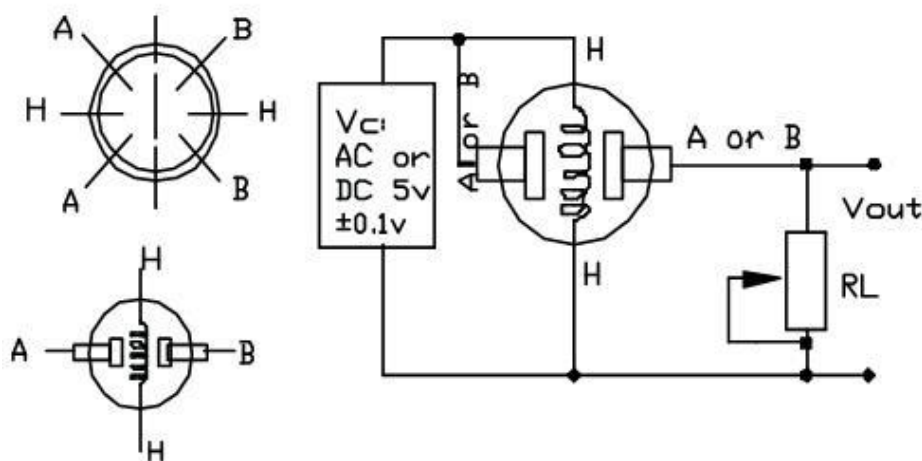


Figura 15: Ligação do sensor MQ-131 [22]

De acordo com o *datasheet* do MQ-131, é aconselhado a utilização de uma resistência de carga, R_L , de 100k a 200k Ω . Neste caso decidiu-se usar uma resistência de 100k Ω e utilizando exactamente o mesmo código que foi utilizado nos testes com o módulo, obtivemos melhores resultados nos valores de tensão de saída com cerca de 4 V, em vez dos quase 1 V obtidos com o sensor montado no módulo.

3.3.1.3 Sensor MICS-4514

A ligação do MICS-4514 foi bastante simples já que o próprio módulo do sensor vem com as saídas VCC, GND, as duas do Analog e uma Digital, sendo apenas preciso soldar os pins ao módulo. No *datasheet* [24] afirmam que uma fonte de alimentação com 5 V é o suficiente para alimentar os dois sensores instalados no módulo. Utilizando um código encontrado no repositório do GitHub, foi possível obter os valores de saída de tensão, sendo estes coerentes segundo as informações encontradas no *datasheet* do sensor, que indicam que os valores típicos para o sensor OX, são na ordem dos 2 V.

```
// Código utilizado para medir valores de tensão do sensor MICS-4514

#define PRE_PIN      8 // Define o pin digital ao qual o sensor está conectado
#define VNOX_PIN     A0 // Define o pin analógico ao qual o sensor OX está conectado
#define VRED_PIN     A1 // Define o pin analógico ao qual o sensor RED está conectado

int vnox_value = 0;
int vred_value = 0;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
    vnox_value = analogRead(VNOX_PIN) * (5.0 / 1023.0); // Converte o valor analógico para valor de tensão
    vred_value = analogRead(VRED_PIN) * (5.0 / 1023.0); // Converte o valor analógico para valor de tensão

    //imprime os valores de tensão de ambos os sensores no monitor
    Serial.print("Vnox: ");
    Serial.print(vnox_value, DEC);
    Serial.print(" Vred: ");
    Serial.println(vred_value, DEC);
    delay(1000); // intervalo de 1 segundo para uma nova medida
}
```

Figura 16: Código do Sensor MICS-4514

3.3.1.4 Construção caixa

De maneira a facilitar o manuseamento do protótipo e o seu transporte foi decidido criar uma caixa de maneira a poder colocar todos os seus componentes no interior. A caixa deve também servir de protecção ao hardware que se encontra lá dentro, da água da chuva e ao mesmo tempo permitir um fluxo de ar contínuo dentro da caixa para que os sensores consigam detectar os gases presentes na atmosfera e realizar leituras da temperatura e humidade relativa. A caixa utilizada, nesta dissertação foi a mesma utilizada numa dissertação anterior [25], com dimensões de 159*140*60mm.

Sendo um dos requisitos o fluxo de ar contínuo através da caixa, esta já tinha os orifícios feitos para a entrada de ar assim como a instalação de uma ventoinha com o propósito de reciclar o ar no interior da caixa. Existe ainda uma abertura para se poder conectar o transformador ao DC conector do LM2596S que transforma os 12 V em 5 V e alimenta o sistema de sensores. Posteriormente foram adicionadas duas placas de alumínio no topo da caixa, que previnem a entrada de água da chuva na ventoinha, caso chovesse durante a realização das medições em espaços exteriores. Foi também colocada uma espécie de filtro, uma peça de espuma, em frente aos orifícios da caixa para controlar o fluxo de ar de maneira a não gerar muita turbulência e evitar a entrada de impurezas no ar, poeiras, que possam contaminar e afectar as medições efectuadas pelos sensores.



Figura 17: Caixa do Protótipo

3.3.2 Montagem

Depois dos testes individuais realizados e todos os problemas solucionados, fez-se a montagem dos três sensores numa *breadboard*, e foram testados ao mesmo tempo não apresentando qualquer problema. Avançou-se então para a instalação dos últimos dois componentes, o SD Card Shield e o RTC, ambos têm o seu funcionamento bem fundamentado nos *datasheets* e nos fóruns de Arduino e no repositório do GitHub de onde se extraiu os códigos associados a cada componente e se modificou de maneira a serem inseridos no código final, Anexo A.

Com todos os componentes ligados ao mesmo tempo, foi altura de testar o funcionamento do protótipo durante largos períodos, cerca de 3 a 5 dias. É importante referir que estes ensaios foram realizados em ambientes fechados, isto é, no interior de uma sala onde a presença de O_3 e NO_2 é quase nula. Neste ensaio a alimentação foi feita através de um cabo USB que ligava a placa Arduino ao computador. Começaram então a surgir sinais de mau funcionamento nos sensores, nomeadamente o MQ-131 e o MICS-4514, os valores de tensão de saída não eram o esperado, em vez de existir um decréscimo ligeiro nos valores de tensão até se obter um valor mais ou menos constante, correspondendo ao aquecimento dos sensores, estes valores eram inconstantes e estavam aos “saltos”, isto é a tensão subia e descia sem nexos. Sem descobrir inicialmente a origem do problema, testou-se desconectar todo o sistema e montá-lo de novo, usando cabos *jumper* e resistências novas. Estas soluções não surtiram o efeito desejado e não resolveu o problema da variação dos valores de tensão. Concluiu-se com base em resultados de trabalhos semelhantes, que o Arduino não conseguia aguentar com a carga exigida pelos sensores e não fornecia os 5 V necessários para o bom funcionamento do sistema. Foi então decidido que a alimentação teria de ser feita de maneira diferente e optou-se pelo uso de um transformador de 12 V e o uso de um regulador de tensão para limitar aos 5 V, esta tensão ao contrário da fornecida pelo Arduino é feita de maneira constante não havendo sobrecarga. Realizando novos testes verificou-se que desta maneira o protótipo funcionava como esperado não ocorrendo variações bruscas nos valores de tensão de saída. Pouco tempo depois detectou-se novamente a mesma anomalia no sistema, mas desta vez o problema não era da fonte de alimentação. Para o despiste do problema desmontou-se o sistema e reconstruiu-se de modo a verificar que todos os cabos *jumper* estavam a fazer bem as ligações entre sensores, *breadboard* e a placa de Arduino. Com esta verificação feita, e após realizar novas medições o problema persistia. Para uma melhor percepção do que poderia estar a acontecer, decidiu-se realizar as medições fora da caixa, e assim se identificou o problema, o regulador de tensão que supostamente estava programado para dar 5 V ao

sistema de sensores, estava a variar no seu valor de tensão de saída, provocando uma variação nos valores de tensão de saída dos sensores. A solução mais eficaz para este problema foi adquirir um regulador de tensão novo e trocá-lo no protótipo.

Em relação à montagem final no interior da caixa foi preciso ter em conta algumas considerações, os sensores de O_3 e NO_2 produzem calor o que pode afectar as medições de todos os sensores presentes na caixa, para contrariar este efeito os sensores foram distribuídos na *breadboard* com algum espaçamento entre eles e a *breadboard* foi colocada perto da ventoinha para extrair o calor originado pelos sensores. O sensor MQ-131 foi colocado com o topo do sensor virado na direcção oposta ao fluxo do ar, para que o sensor não apanhe o ar directamente.

De referir que foi instalado outro sensor de ozono com o intuito de verificar a veracidade do mesmo, pois este sensor sendo exactamente igual ao sensor comprado no início desta dissertação, ou seja, é o mesmo modelo o MQ-131, tem a particularidade de já ter sido comprado no ano anterior e utilizado também numa experiência semelhante [25]. Usou-se, portanto, os dois sensores ao mesmo tempo para se fazer uma comparação entre os mesmos.

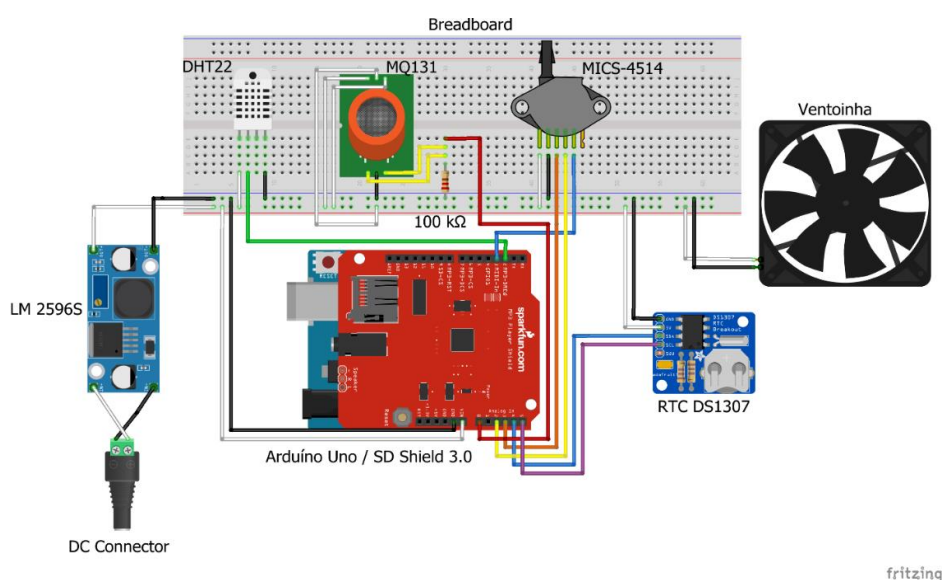


Figura 18: Esquema final das ligações do protótipo

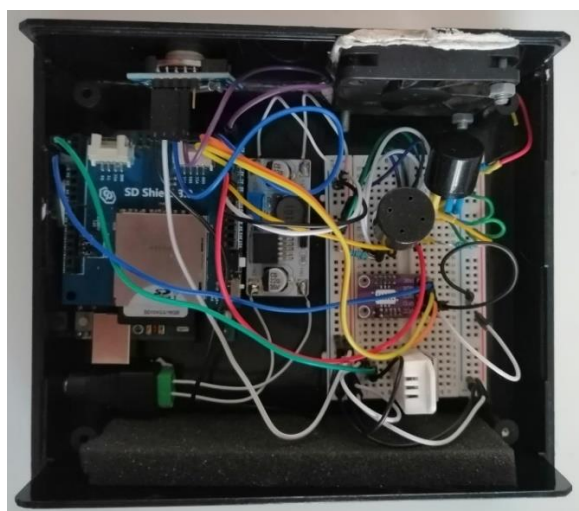


Figura 19: Caixa do protótipo completa

3.4 Análise de Consumo

Para se poder dimensionar uma bateria que alimente a estação sem falhas de energia, foi preciso analisar o consumo de cada componente do protótipo, recorreu-se às fichas técnicas de cada um para determinar os consumos de corrente eléctrica, tabela 8.

Tabela 8: Consumo dos componentes do protótipo

Componente	Consumo (mA)
MQ-131	200
MICS-4514	232
DHT22	2.5
SD Shield 3.0	100
Ventoinha	110
Total	644.5

Para estimar o consumo do protótipo em Wh multiplicou-se os 12 volts pelo consumo total dos componentes em amperes e por 1 hora. Dando um valor de 7,7 Wh. Para uma percepção do consumo total durante a campanha de monitorização multiplicou-se o valor anterior pelo número de horas que o protótipo esteve ligado na estação de referência dando um consumo de 1,64 kWh.

Na figura que se segue estão descritos os limites do Arduino tanto os de corrente como os de tensão.

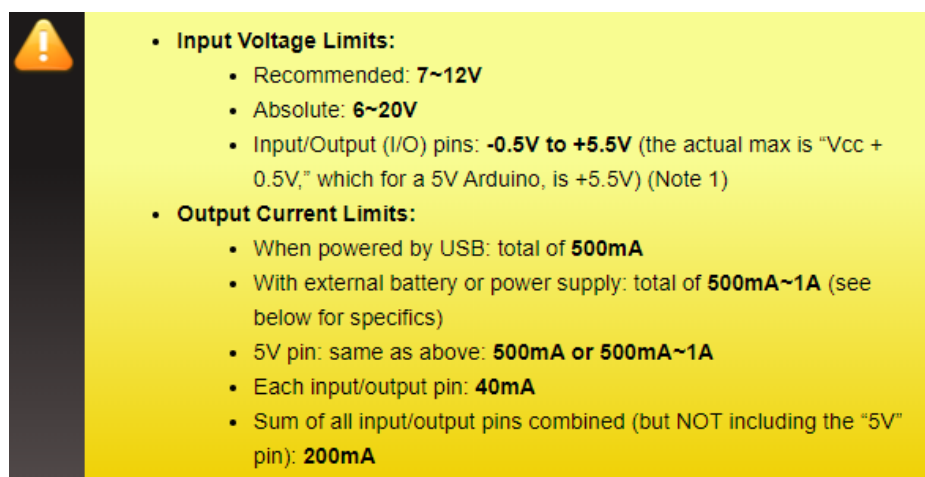


Figura 20: Limites de corrente e tensão do Arduino

A partir da figura acima podemos concluir que o mau funcionamento dos sensores durante os primeiros testes, quando estes ainda estavam a ser alimentados pelo Arduino a 5 V, correspondente à alimentação por USB, teve origem na fraca alimentação de tensão e corrente eléctrica ao Arduino. Observando a tabela 9 dos consumos de corrente dos componentes, temos um consumo total de 644.5 mA sendo que o limite quando a alimentação é feita pelo USB é de 500mA, percebe-se então que o Arduino muito provavelmente não estava a conseguir lidar com a carga que tinha de distribuir e explica também o porquê deste problema

ter desaparecido assim que se trocou a fonte de alimentação para ser directamente alimentado por um transformador. Ao usar um transformador o limite de corrente passa para um intervalo entre os 500mA e 1A, onde o nosso protótipo se enquadra.

3.5 Análise de Custos

Os componentes foram escolhidos com o intuito de construir uma estação de monitorização da qualidade do ar de baixo custo. O conceito de *Low Cost* nesta dissertação refere-se ao custo inicial na aquisição dos componentes do sistema de sensores quando comparado com os custos de aquisição dos instrumentos de referência que medem os mesmos poluentes, na estação de qualidade do ar em Entrecampos. Como podemos ver na tabela 9, a estação teve um custo de aproximadamente 100 euros.

Tabela 9: Custo dos componentes do protótipo

Componente	Custo (€)
MQ-131	16.7
MICS-4514	16.2
DHT22	2.3
Placa Arduino Uno	30.8
SD Shield 3.0	4.7
Real Time Clock	5.9
LM2596S	2.6
Ventoinha	6.6
Caixa	5.8
Total	91.6

3.6 Estação de monitorização de Entrecampos

No início desta dissertação o objectivo principal visava a construção de um protótipo que permitisse realizar medições de ozono e dióxido de azoto, recolhendo também a temperatura e a humidade relativa. Com este objectivo atingido passou-se ao seguinte, testar o protótipo com uma estação de referência nacional da CCDR LVT. Optou-se pela estação de Entrecampos para realizar uma campanha de monitorização, por esta ser uma estação que mede os mesmos poluentes que o nosso protótipo, O₃ e NO₂.

Contactou-se a CCDR LVT para a realização de uma visita com intuito de ficar a conhecer a estação de Entrecampos, tanto a nível técnico, como por exemplo, que técnicas eram usadas pelos aparelhos na recolha das amostras e no tratamento posterior dos dados, como também a nível de infra estrutura de

maneira a fazer uma avaliação do local para a implementação do protótipo para que este realizasse as medições nas melhores condições. Esta visita ocorreu no dia 4 de Julho de 2019.

A instalação do protótipo ocorreu no dia 26 de Agosto, o protótipo foi colocado no telhado da estação para que os sensores pudessem recolher as amostras ao mesmo nível que os sensores da estação de referência, embora estes tivessem uns centímetros mais elevados assumiu-se que não haveria influência, como podemos ver na figura 21. Para fazer a alimentação de energia eléctrica do protótipo foi necessário recorrer ao uso de uma extensão desde o interior da estação até ao telhado. Embora a previsão meteorológica da semana em que se fez a campanha de monitorização não desse possibilidade de chuva, teve-se o cuidado de elevar o protótipo o suficiente para caso chovesse e, por conseguinte, o telhado ficasse alagado, não afectaria o material eléctrico presente no protótipo. A campanha de monitorização ocorreu então desde o dia 26, data da instalação, até ao dia 6 de Setembro, altura em que se efectuou a recolha do protótipo da estação de Entrecampos para se realizar a análise dos dados obtidos durante esse período.

É importante referir que os dados referentes a este dia não estão disponíveis ao público, isto é, no portal da Qualar os últimos dados publicados são referentes ao ano anterior. Portanto os dados tiveram de ser solicitados à CCDR LVT para que se pudesse fazer uma análise. Também foi pedido o custo dos equipamentos para as medições de O_3 e NO_x , esses valores estão presentes na tabela 10, e o consumo de energia eléctrica, mas até à data não esta informação não foi fornecida, de salientar que a estação tem ar condicionado para garantir o bom funcionamento dos analisadores de gases.

Tabela 10: Custo dos Equipamentos da estação de Entrecampos

Componente	Custo (€)
Analizador de NO_x	7 500
Analizador de O_3	5 700
Total	13 200



Figura 21: Implementação do protótipo na estação de referência nacional da CCDR LVT - Entrecampos

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo irão ser apresentados os resultados obtidos com o protótipo funcional que irão possibilitar a recolha de conclusões sobre o desempenho dos sensores.

A experiência para ser considerada válida, terá de ser superior a dois dias, devido ao pré-aquecimento necessário dos sensores, caso do MQ-131, o MICS-4514 precisa de menos tempo segundo a sua ficha técnica. A decisão da duração da experiência, mais do que 7 dias, deve-se ao facto de se querer comparar dias úteis com dias de fim de semana, onde teoricamente aos dias úteis existe um maior tráfego automóvel junto à estação de referência relativamente aos fins de semana em que existe menos veículos a circular. Todos os dados foram recolhidos, analisados e trabalhados em Excel, de forma a despistar qualquer mau funcionamento dos sensores e de maneira a permitir a análise gráfica.

4.1 Resultados Preliminares

As medições preliminares foram realizadas à medida que se construía o protótipo, com o intuito de verificar o bom funcionamento de todos os componentes quando utilizados ao mesmo tempo. Estas medições decorreram durante o dia e noite, numa sala fechada com uma janela. Teoricamente numa sala fechada, o nível de ozono e dióxido de azoto será perto de 0, isto é, o valor medido em tensão irá ser um valor desconhecido, mas constante. Desconhecido porque até à altura não se fez qualquer tipo de calibração ao sensor, estando este apenas a transmitir valores de tensão que mais tarde serão interpretados com a ajuda de um sensor de referência.

Nas primeiras experiências, testou-se os sensores com alimentação vinda do Arduino a 5V, que não era o suficiente, como foi mencionado no capítulo anterior. A figura seguinte trata-se de um dos primeiros testes realizados quando todos os componentes operavam simultaneamente.

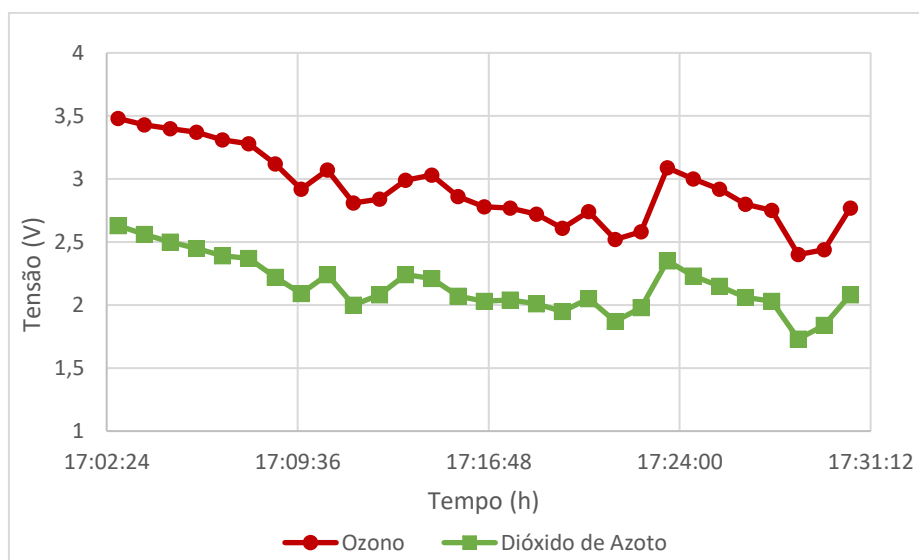


Figura 22: Primeiro teste dos sensores MQ-131 e MICS-4514

Como podemos observar na figura 22, o comportamento dos sensores é estranho, visto que se trata de uma fase de pré-aquecimento dos mesmos, era expectável que os valores de tensão fossem diminuindo gradualmente e tal não se verificou. Os valores de tensão de saída eram bastante inconstantes tendo quedas e subidas abruptas sem qualquernexo. Sem saber o verdadeiro motivo do problema, reconstruiu-se o protótipo assumindo que o erro estaria nalgum fio mal conectado, mas esta solução não trouxe melhorias e o resultado obtido era o mesmo. Foi então que se descobriu que a alimentação do protótipo não poderia ser feita através do Arduíno e teria de se recorrer a uma fonte externa, um transformador de 12V e utilizar um regulador de tensão para limitar a entrada de 5V.

Depois de solucionado o problema, testou-se de novo o protótipo e os valores de tensão de saída já correspondiam ao comportamento natural dos sensores como podemos observar na figura 23.

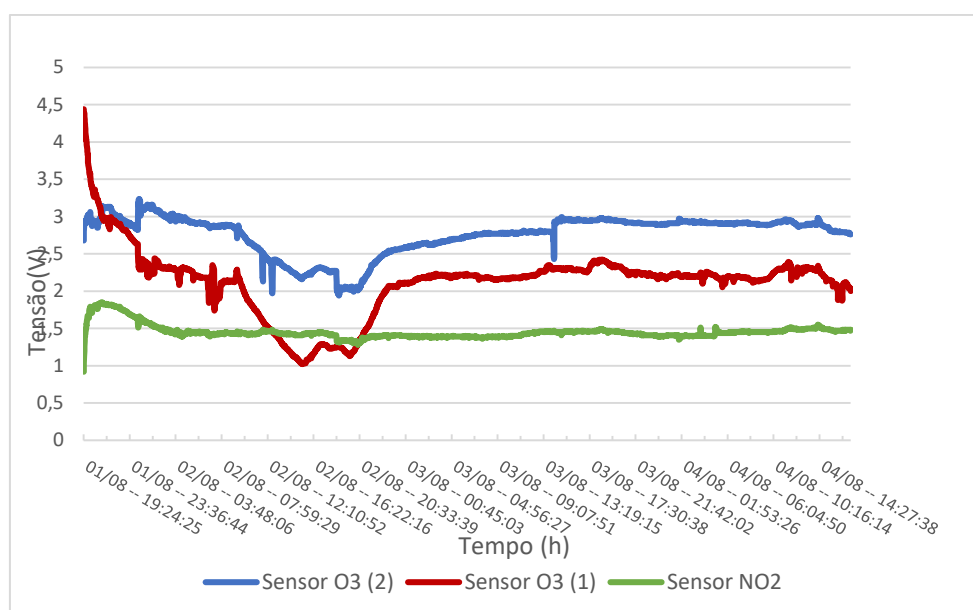


Figura 23: Teste dos sensores MQ-131 e MICS-4514

Para uma melhor leitura dos gráficos entende-se que o Sensor O3 (1) designa o sensor principal, o que foi comprado propositadamente para esta dissertação e o Sensor O3 (2) o sensor já existente e com uso.

Na figura 21 está representado o comportamento dos sensores desde o momento em que foram ligados a uma fonte de alimentação até que se desligou essa fonte. Como era expectável, segundo as fichas técnicas, os sensores precisariam de um certo período de tempo até produzirem valores coerentes com a realidade, o chamado pré-aquecimento que varia de sensor para sensor. No nosso caso o sensor de O3 precisou de mais de 24 horas para estabilizar enquanto o sensor de NO2 teve os seus valores estabilizados ao fim de aproximadamente 8 horas.

De referir que ambos os sensores de O3 apresentam um comportamento análogo, apesar dos seus valores de tensão não coincidirem. Esta diferença de valores na tensão de saída pode ser justificada com o desgaste que o sensor (2) poderá apresentar por ter sido manuseado anteriormente em experiências idênticas.

Com estes testes preliminares concluídos verificou-se que os sensores apresentavam um bom funcionamento e decidiu-se então avançar para a próxima fase, a implementação do protótipo na estação de Entrecampos.

4.2 Resultados com estação de Entrecampos

Os resultados acima apresentados apenas apresentam os valores de tensão de saída dos sensores, e é impossível com estes valores tirar conclusões sobre a qualidade do ar, isto é, conseguimos observar que a tensão aumenta ou diminui durante um certo período de tempo, mas não conseguimos fazer corresponder esses valores de tensão às unidades utilizadas em experiências deste género, sendo essas unidades o $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a unidade de referência. É então neste subcapítulo que se vai associar um certo valor de tensão a um valor em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, unidade utilizada pela CCDD LVT nas suas medições de acordo com o especificado na regulamentação nacional.

Como referido anteriormente realizou-se uma campanha de monitorização numa estação de referência, a estação de Entrecampos, durante 10 dias. Durante esses dias o protótipo recolheu dados referentes às concentrações de ozono e dióxido de azoto com intervalos de 1 minuto para assegurar que se registava as mudanças quando estas aconteciam. Nos dados fornecidos pela CCDD LVT, em ambos os poluentes os resultados vinham com valores de 15 em 15 minutos, foi então necessário fazer uma média dos valores medidos pelo protótipo de modo a corresponderem ao mesmo intervalo que os valores da estação de referência para que se pudesse comparar os dados. Os resultados serão apresentados em subcapítulos diferentes pois trata-se de sensores com medições de poluentes distintos.

4.2.1 MQ -131

Em primeiro lugar analisou-se os dados tal como foram recebidos, com intervalos de 15 em 15 minutos de maneira a observar a variação da concentração de ozono ao longo do dia. Aplicou-se o mesmo método a todos os dias. Abaixo será representado um desses dias, os restantes estarão no Anexo B.

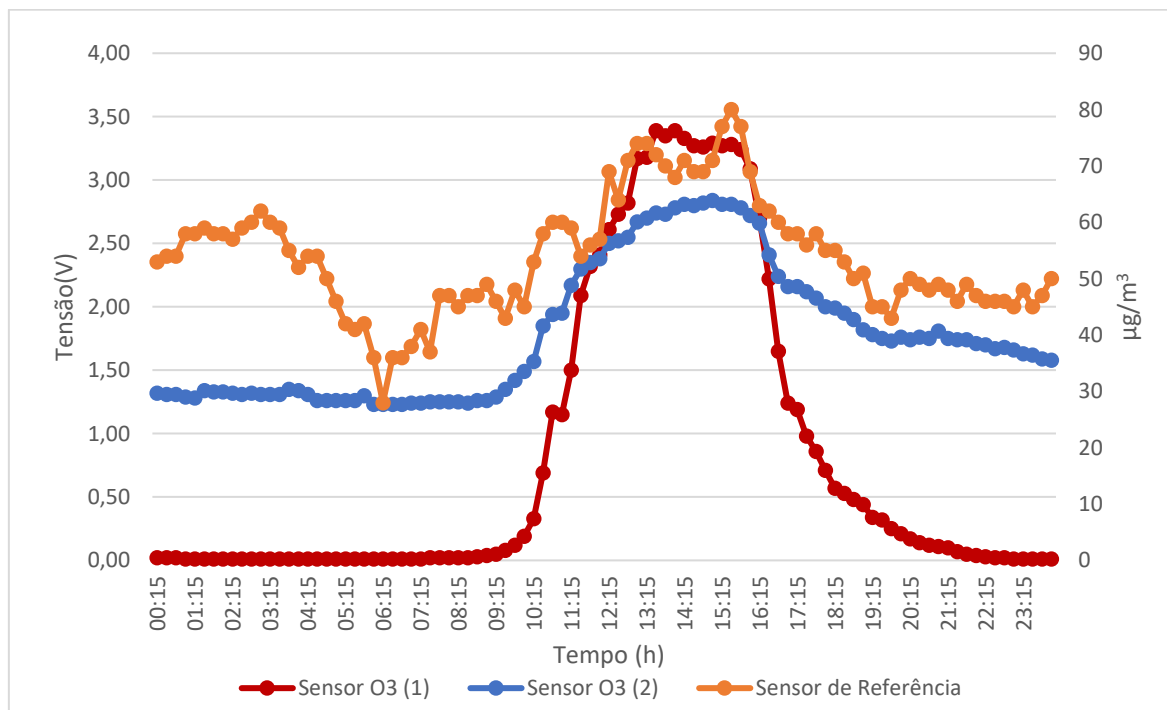


Figura 24: Medição de Ozono - Dia 28 de Agosto

Ao observarmos o gráfico da figura 24, a curva desenhada pelo sensor de referência tem bastantes variações que correspondem ao aumento e à diminuição da concentração de ozono no ar. Este comportamento segue o expectável visto que a concentração de ozono aumenta é proporcional ao aumento da temperatura ambiente. Neste caso, no dia 28 de Agosto podemos ver que a temperatura foi aumentando até ao seu máximo diário, 28°C às 14:00 e a partir daí começou a diminuir durante o resto do dia, esta informação foi recolhida *online* [26]. Foi preciso recorrer a dados *online* pois o sensor que foi instalado no protótipo e recolheria informações sobre a temperatura e humidade ao longo da campanha de monitorização, o DHT22, teve um imprevisto e como podemos ver no gráfico presente na figura 23 o DHT22 registou uma temperatura máxima de 46,5°C o que não corresponde à temperatura exterior mas sim à temperatura no local dos analisadores. Este mau funcionamento irá ser explicado nas conclusões da dissertação. Em relação aos sensores de ozono parece existir um comportamento estranho em certos períodos de tempo, no que diz respeito ao sensor (1), pois, durante grande parte do dia o seu valor de tensão é muito próximo de 0, aumentando subitamente a sua tensão de saída por volta das 9:00 da manhã atingindo um pico máximo às 15:00, semelhante ao pico da temperatura, e decresce rapidamente até voltar novamente a valores próximos do 0. O sensor (2) apresenta um comportamento semelhante, desenhando uma curva parecida com o sensor (1). Como foi visto nos resultados preliminares ambos os sensores seguem um comportamento semelhante embora os seus valores de tensão variem ligeiramente entre si.

Estes comportamentos podem ser afectados pela amplitude de detecção dos sensores ao O₃, como podemos ver na tabela 5, o sensor capta concentrações compreendidas entre os 10 ppb e os 1000 ppb. Visto que as unidades de referência dos dados fornecidos pela CCDR LVT são em µg/m³ fez-se a conversão de ppb para µg/m³ de maneira a ficarmos com unidades iguais através das seguintes expressões:

$$\text{Concentração } \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \text{Concentração (ppb)} * \frac{\text{Massa Molar } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{\text{Volume Molar (L)}} \quad (1)$$

No caso do ozono, este tem uma massa molar de 48 g/mol e o volume molar para uma pressão de 1 atmosfera e uma temperatura de 25°C tem um valor de 24.47 L. Usando estes valores podemos simplificar a equação acima e usar a seguinte expressão para converter valores de ppb em µg/m³ ou vice-versa.

$$\text{Concentração } O_3 \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = 2 * \text{Concentração } O_3 \text{ (ppb)} \quad (2)$$

Utilizando a equação (2) podemos afirmar que a amplitude de detecção do sensor de O₃ tem como mínimo e máximo valores de 20 µg/m³ e 2000 µg/m³ respectivamente. A partir destes valores sabemos que o MQ-131 não irá registar valores fora deste intervalo o que limita o uso deste sensor para concentrações de ozono mais baixas.

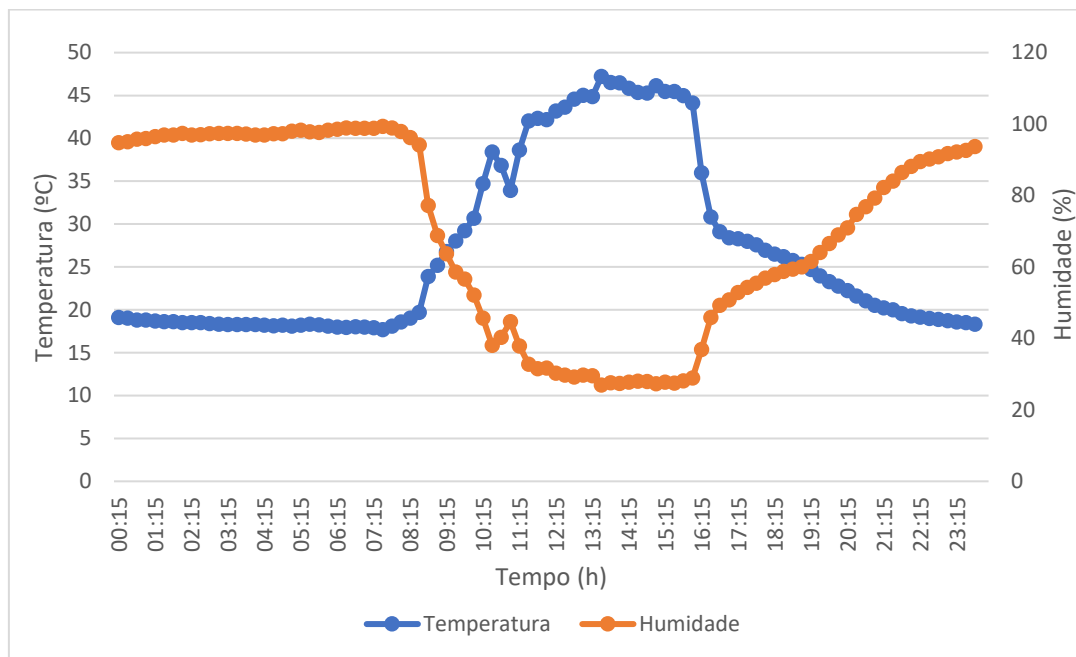


Figura 25: Medição de Temperatura e Humidade Sensor DHT22 - Dia 28 de Agosto

Com base nos gráficos de medição de ozono diário, presentes no Anexo B, realizou-se uma correlação entre os dados da estação de referência e os dados obtidos pelos sensores, com o intuito de criar uma equação que pudesse expressar os valores de tensão em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

$$y = mx + b \quad (3)$$

$$\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} = m * V + b \quad (4)$$

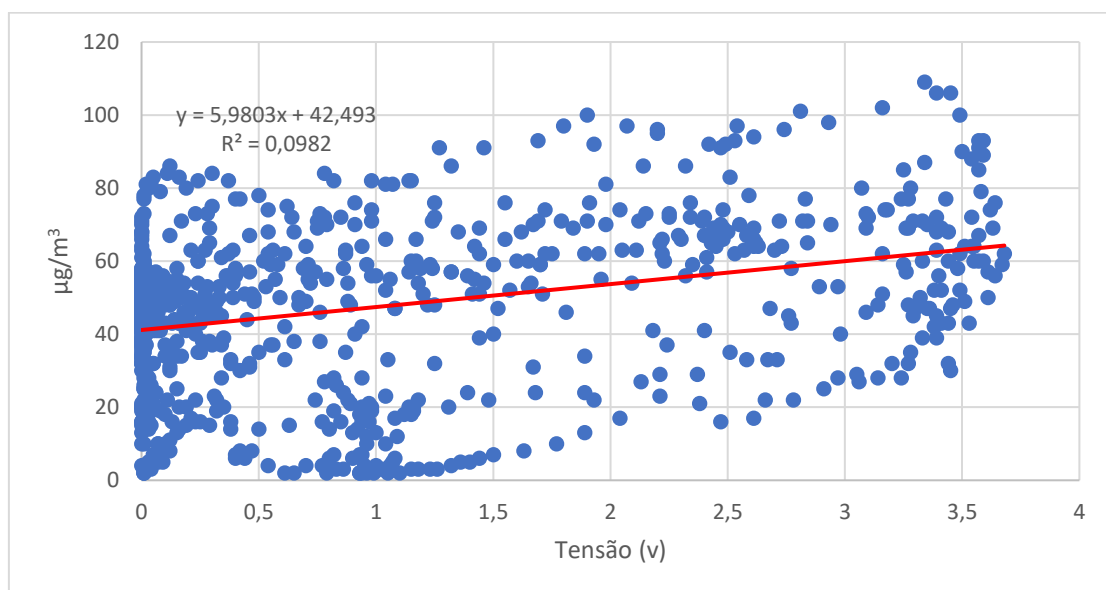


Figura 26: Correlação valores instantâneos de Ozono - Sensor (I)

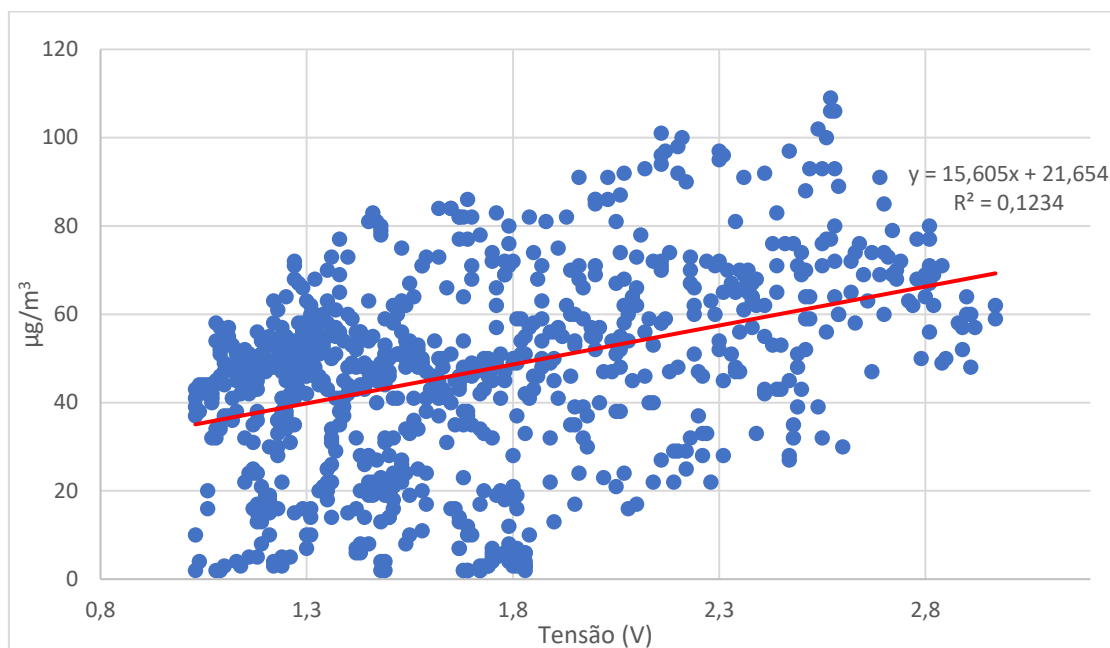


Figura 27: Correlação valores instantâneos de Ozono - Sensor (2)

Através das correlações acima apresentadas, é possível realizar uma regressão linear que permite obter a equação (4). O R^2 é uma medida estatística de quão próximos os dados estão da linha de regressão linear, retorna um valor até 1 sendo que o valor máximo equivale a 100% e indica que o modelo explica toda a variabilidade dos dados. Tendo em conta esta definição, e observando os valores de R^2 em ambos os sensores, conclui-se que as equações criadas a partir desta correlação não vão corresponder à realidade pois os valores de R^2 são muito baixos para serem tidos em conta.

Com as correlações dos valores instantâneos a apresentarem resultados tão baixos, decidiu-se transformar os valores em valores médios diários de maneira a tentar ter uma equação que pudesse associar um certo valor de tensão a um valor em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sem um grande erro. Esta escolha permite também ter uma melhor percepção da variação diária da concentração de ozono durante a campanha de monitorização como podemos ver na figura 28.

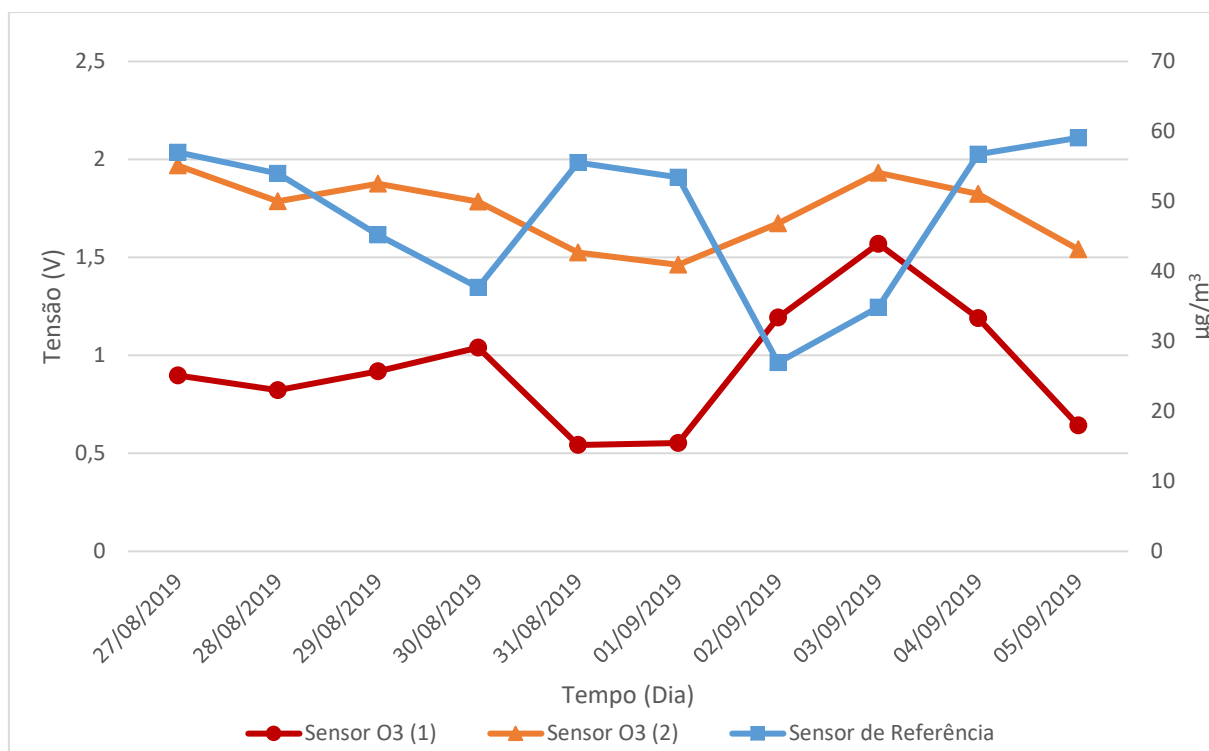


Figura 28: Valores médios diários de Ozono

Como podemos ver através do gráfico acima representado, ambos os sensores instalados no protótipo seguem a mesma tendência, quando um detecta uma diminuição da concentração de ozono no ar, o outro também detecta. Podemos ver que o sensor de referência tem um comportamento distinto comparativamente aos sensores *low cost*, com maior evidência nos dias de fim-de-semana, 31 de Agosto e 1 de Setembro, em que o sensor de referência regista um aumento significativo de ozono e registando o seu valor mais baixo, numa segunda-feira. Enquanto ambos os sensores utilizados na campanha de monitorização, têm os seus valores mais baixos a um fim-de-semana e verificam um aumento de tensão no dia seguinte. Teoricamente não faz sentido este aumento de concentração de ozono em dias como sábado e domingo, pois existe menos tráfego automóvel em relação aos dias de semana, que têm sempre um maior número de carros a circular perto da estação de Entrecampos, pois trata-se de uma localização bastante central e movimentada. Existe o chamado *Weekend Effect*, que é a ocorrência de concentrações máximas de ozono de superfície, em muitas áreas urbanas aos fins de semana, apesar de haver emissões mais baixas de precursores de ozono, compostos orgânicos voláteis de carbono e óxidos de azoto em relação aos dias úteis da semana [29].

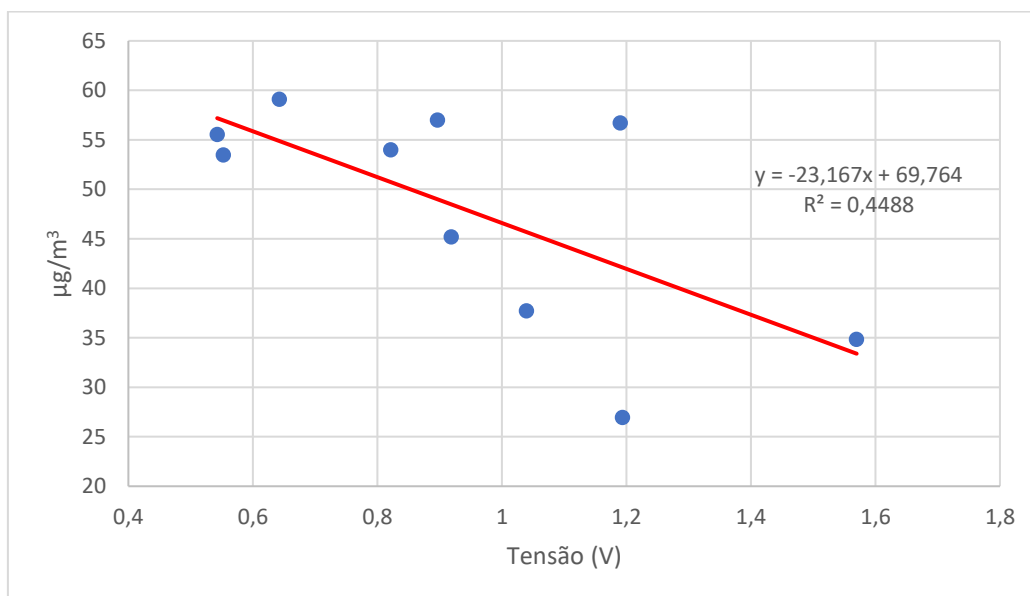


Figura 29: Correlação valores médios diários Ozono - Sensor (1)

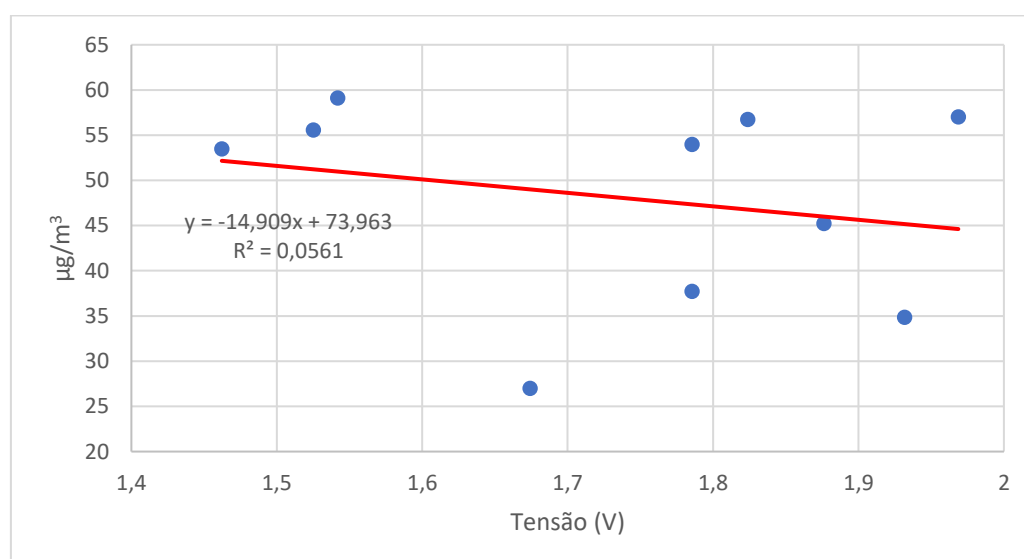


Figura 30: Correlação valores médios diários Ozono - Sensor (2)

Com base nos valores médios diários de cada sensor utilizado na dissertação foram feitas novas correlações de modo a averiguar se estes valores se aproximam mais dos valores medidos pela estação de referência. Obteve-se resultados diferentes para cada sensor, o sensor (1) foi o que teve uma melhor aproximação aos valores reais, enquanto o sensor (2) teve um R^2 bastante baixo para ser possível correlacionar os valores de tensão obtidos usando a equação descrita em (2). Este resultado pode dever-se ao facto do sensor (1) ter sido adquirido propositadamente para esta dissertação, portanto irá possuir uma maior fiabilidade e ter menos ruído que o sensor (2), pois este já foi utilizado numa outra dissertação com experiências semelhantes, como foi referido no início deste capítulo.

Como foi referido no capítulo 2.4, o ozono tem um limite de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um tempo de exposição de 8 horas, de acordo com a *Air Quality Guidelines* [14], foi então realizada uma correlação com médias de

8 horas entre os valores do MQ-131 e a estação de referência para averiguar se a estação *low cost* criada serve o propósito de medir os limites legais de ozono emitidos pela OMS.

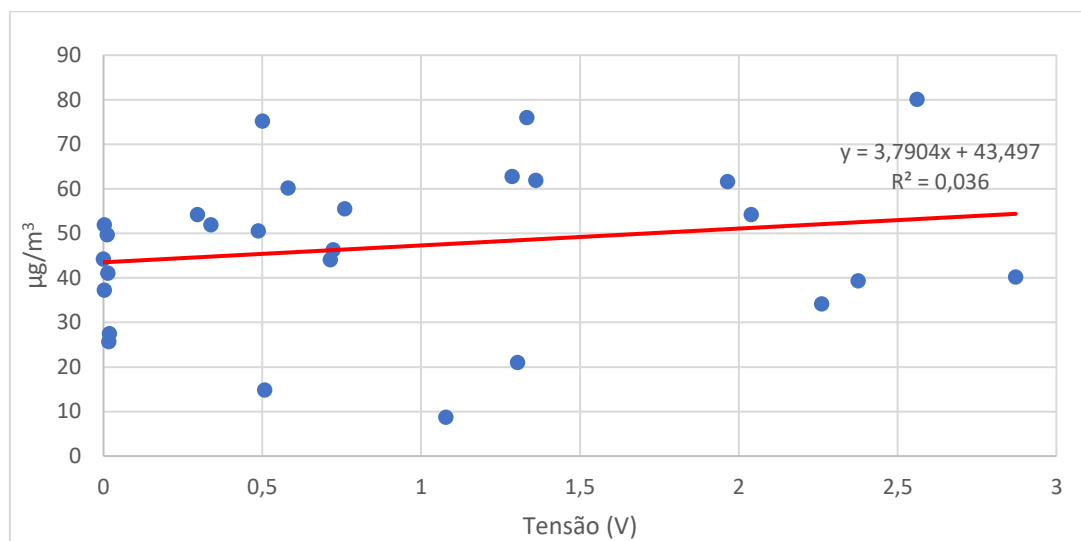


Figura 31: Correlação Média 8 Horas de Ozono - Sensor (1)

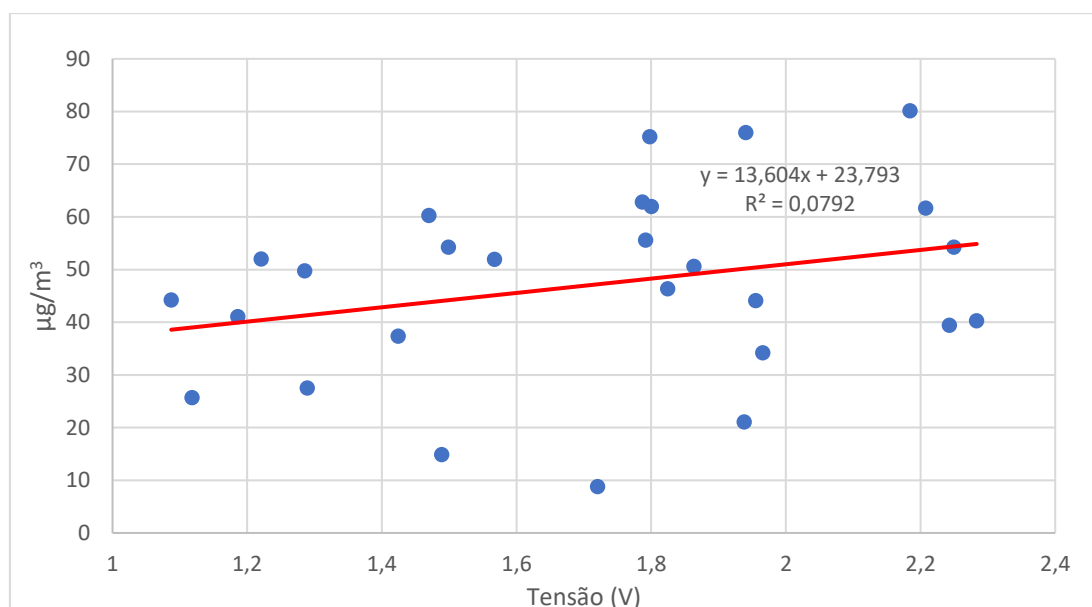


Figura 32: Correlação Média 8 Horas de Ozono - Sensor (2)

Pelos R^2 das rectas de tendência traçadas em cada gráfico conclui-se que esta estação *low cost* não pode ser utilizada para medir os limites de ozono tendo em conta a média de 8 horas, pois o R^2 é um valor muito baixo, não transmitindo confiança absolutamente nenhuma nos resultados que seriam obtidos usando a equação (4), em ambos os sensores.

4.2.2 MICS-4514

A análise dos dados do sensor de dióxido de azoto seguiu as mesmas premissas utilizadas acima no tratamento do sensor de ozono. Começou-se então por comparar os valores de tensão obtidos pelo sensor instalado no protótipo com os valores da estação de referência em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, em intervalos de 15 minutos ao longo de um dia.

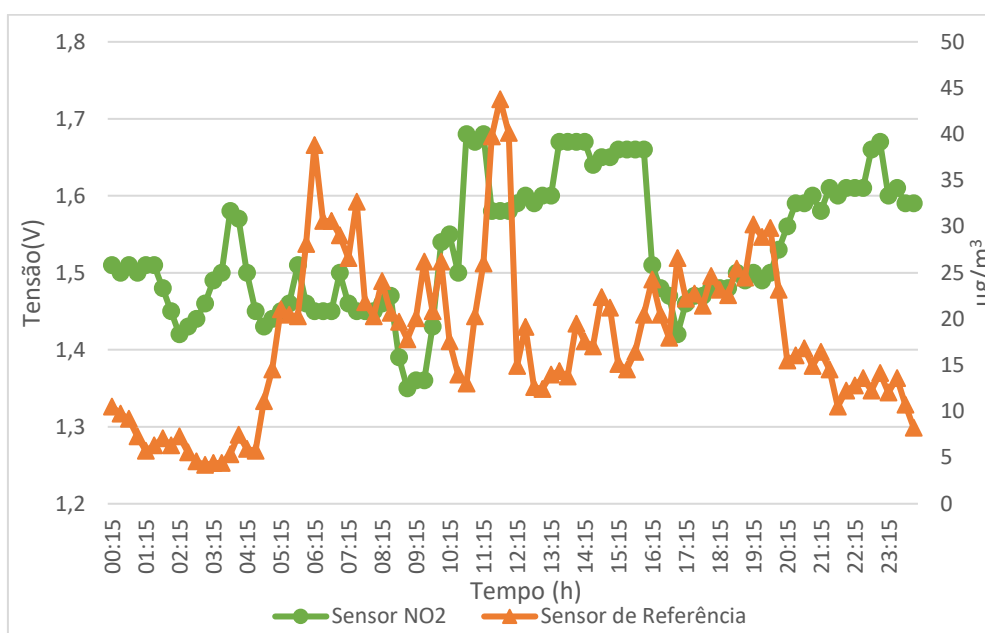


Figura 33: Medições Dióxido de Azoto - Dia 28 Agosto

Observando o gráfico acima representado, embora alguns comportamentos sejam semelhantes entre os sensores, verifica-se uma ligeira discordância entre eles, sendo visível essa oposição de comportamentos no período final do dia onde o sensor de referência verifica um decréscimo de concentração de dióxido de azoto no ar enquanto o sensor *low cost* tem um aumento de valores de tensão.

Observando a tabela 6, verifica-se que o sensor tem uma amplitude de detecção de NO_2 entre 50 ppb e 5000 ppb. Utilizando a equação (1) é possível fazer a conversão para valores em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sabendo que a massa molar do dióxido de azoto é 46 g/mol obtém-se a seguinte expressão:

$$\text{Concentração } \text{NO}_2 \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = 1,88 * \text{Concentração } \text{NO}_2 \text{ (ppb)} \quad (5)$$

Com a equação acima descrita, transformamos os valores de ppb em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o que dá um intervalo de detecção com valores entre os 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 9400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Os restantes gráficos referentes ao resto dos dias da campanha de monitorização podem ser consultados no Anexo B.

Tal como no MQ-131, fez-se uma combinação de todos os resultados obtidos na campanha de modo a ser possível criar uma correlação que nos permite criar a equação (4) que irá converter os valores de tensão recolhidos em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

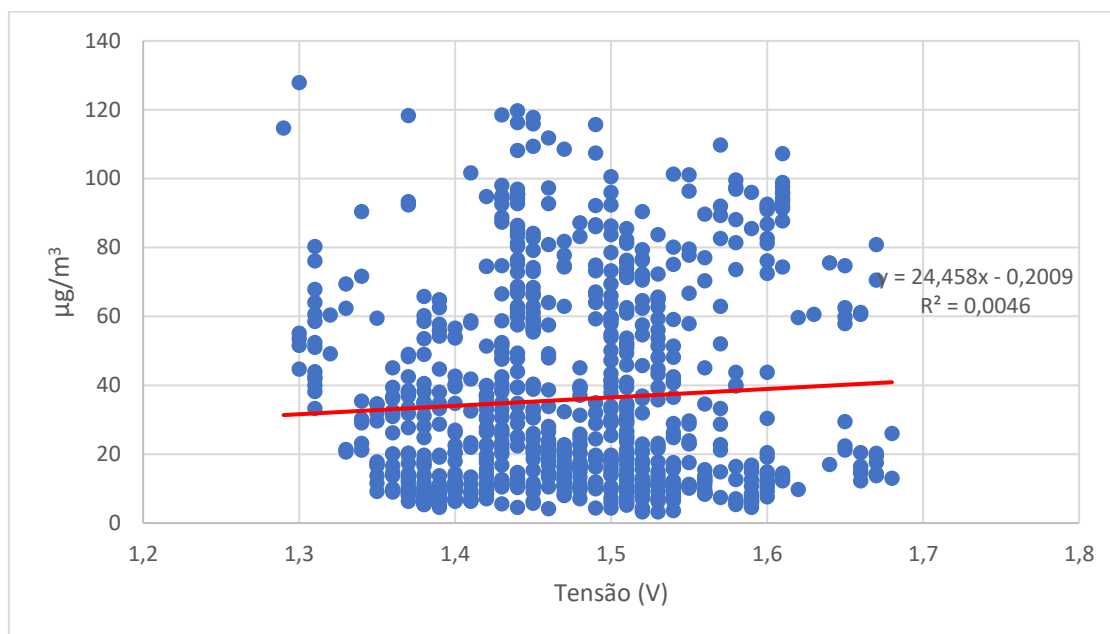


Figura 34: Correlação valores instantâneos de Dióxido de Azoto

Assim como no caso do MQ-131, também este sensor apresenta um R^2 bastante baixo para que esta equação possa ter credibilidade científica. Isto deve-se ao facto de em ambos os casos, tanto no MQ-131 como no MICS-4514, os valores de tensão registados pelos mesmos num certo período de tempo estarem associados a vários valores de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

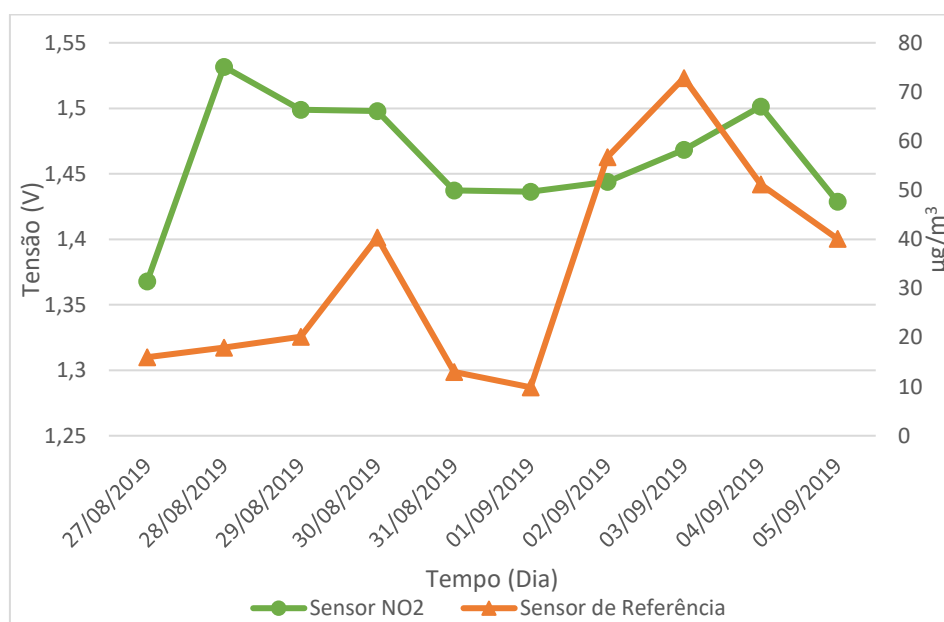


Figura 35: Valores diários médios de Dióxido de Azoto

Ao analisarmos o gráfico 35, mais especificamente a curva do sensor de dióxido de azoto, o MICS-4514, existe um aumento significativo do 1º dia para o 2º dia, isto deve-se ao facto de o sensor estar em pré-

aquecimento e ir estabilizando o que aconteceu no dia 28 de Agosto. Comparando a curva do MICS-4514 e o sensor de referência, nota-se uma ligeira semelhança em termos de comportamento do sensor, no que toca a valores quantitativos existe uma grande diferença entre eles, especialmente no dia 2 de Setembro onde o MICS-4514 não regista um aumento tão elevado como a estação de Entrecampos. Em relação aos dados da curva do sensor de referência, é de salientar os dias de fim-de-semana, dia 31 de Agosto e 1 de Setembro onde os valores de NO_2 descem drasticamente comparativamente aos dias úteis da semana. Como foi referido no subcapítulo referente ao dióxido de azoto, a sua formação resulta da emissão de NO formado pelos veículos com motores de combustão interna, que juntamente com os VOCs presentes no ar, aumentam a concentração de NO_2 no ar. Tendo em conta a forma como o NO_2 é originado, não é surpreendente que os valores de dióxido de azoto ao fim-de-semana desçam, visto que é quando existe menos tráfego automóvel, logo existe menos emissões de NO, o que resulta em concentrações mais baixas de NO_2 . Em relação aos dias anteriores ao fim de semana seria de esperar que tivessem valores mais próximos dos dias seguintes ao fim de semana, pois trata-se de dias úteis, mas estes apresentam valores como se tratasse de um fim-de-semana. Uma justificação plausível para estes resultados é a altura em que foram realizados, ter coincido com o período de férias de muitos habitantes de Lisboa, o que resulta em menos veículos a circular nas proximidades da estação de Entrecampos.

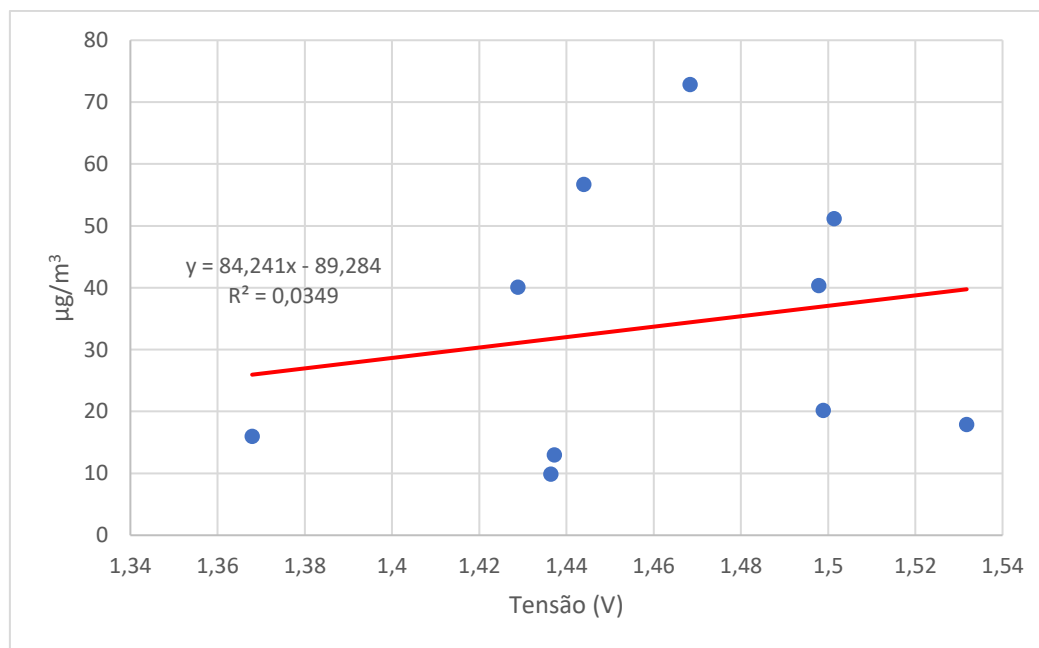
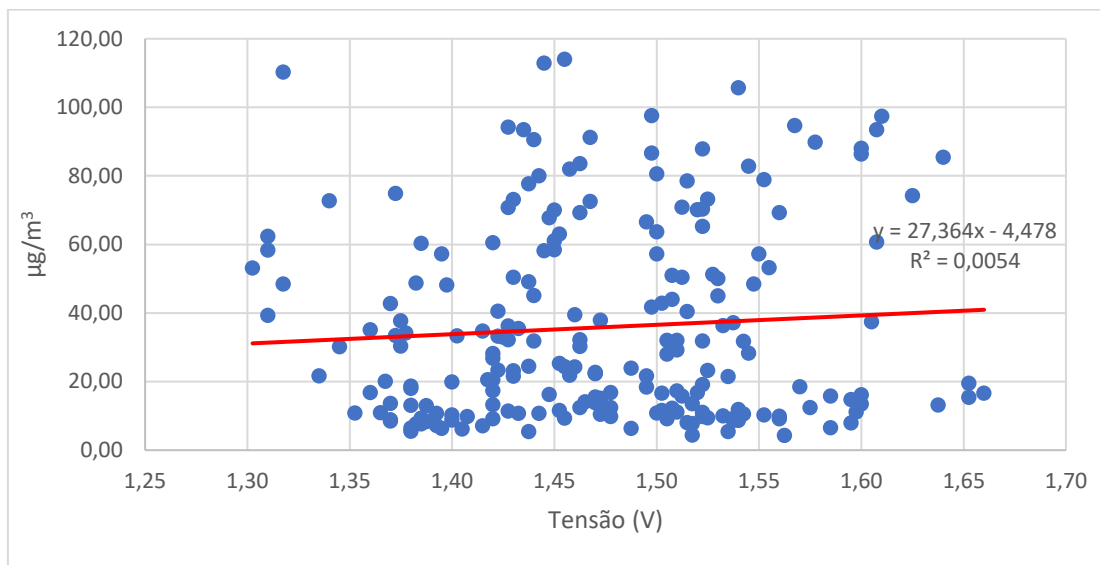


Figura 36: Correlação Média Diárias Dióxido de Azoto

Como se fazia prever pela figura 35, a correlação entre o sensor MICS-4514 e o sensor da estação de referência não foi a melhor, os valores obtidos pelo sensor *low cost* oscilavam bastante em comparação aos dados da estação de Entrecampos, como é possível ver nos gráficos diários presentes no Anexo B. Isto resulta em que a equação dada pela linha de tendência, presente na figura 36, dê valores errados quando aplicado o método da equação (4), onde inserimos o valor de tensão no lugar do x para se obter o respectivo valor em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pois irá dar um valor de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ negativo.

Tal como no sensor de ozono, também se estudou a possibilidade do MICS-4514 poder ser utilizado para monitorizar o limite de dióxido de azoto imposto pela OMS, de acordo com o *Air Quality Guidelines* [15] cujo limite está representado na tabela 4, $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um tempo de exposição de uma hora. Fez-se

novamente uma correlação entre os dados obtidos pelo sensor usado no protótipo e os dados fornecidos do sensor de referência e obteve-se o seguinte gráfico.



E mais uma vez, como também aconteceu para o ozono, obtemos um R^2 muito próximo de 0, o que significa que os resultados obtidos não se correlacionam com os dados fornecidos pela estação. Este resultado comprova que o sensor também não serve o propósito de testar os limites de NO_2 impostos pela OMS.

Capítulo 5

Conclusões

Os objectivos desta dissertação visavam a construção e teste de uma estação de medição de qualidade do ar *low cost* (O_3 e NO_2) em comparação com uma estação de referência nacional da CCDD LVT.

Começando pela fase de construção do protótipo, houve algumas dificuldades na montagem e manuseamento dos sensores, principalmente o MQ-131, devido à falta de informação *online* sobre o sensor quando este acoplado a um módulo e a informação dúbia nas fichas técnicas, pois havia várias fichas técnicas para o mesmo sensor com informações contraditórias, foi tomada a decisão de retirar o sensor do módulo e usar apenas o sensor ignorando o módulo. Na montagem dos sensores dentro da caixa, estes ficaram um pouco mais próximos do que seria desejado, este factor pode ter uma pequena influência nos resultados finais pois é sabido através da ficha técnica que o sensor de ozono aquece quando ligado à corrente eléctrica, tendo em conta que existe dois sensores MQ-131 vai gerar calor o que pode afectar as medições de todos os sensores presentes na caixa, mesmo instalando uma ventoinha para evitar este problema e renovar o ar no interior da caixa. Poderia ter sido usado uma caixa de maiores dimensões para solucionar o problema da proximidade dos sensores uns dos outros, mas conduziria a outro problema, a transportabilidade do sistema que era um dos pontos fulcrais da estação construída.

O sensor DHT22 da maneira como está montado está a registar a temperatura dentro da caixa construída e não a temperatura ambiente, portanto não está a funcionar como sensor climático real, mas sim sensor do “microclima” interno que afeta os sensores de O_3 e NO_2 . Este mau funcionamento como estação climática deve-se a duas decisões tomadas nas duas fases distintas da dissertação, a construção da caixa e a colocação do protótipo no local da campanha de monitorização. O primeiro erro deu-se na construção da caixa, fez-se a instalação do sensor dentro da caixa juntamente com os outros sensores, que por sua vez quando funcionam aquecem emitindo calor no interior da caixa, apesar desta possuir uma ventoinha para circular o ar não foi o suficiente para manter o ar a uma temperatura ambiente. O segundo erro foi durante a implementação do protótipo na estação de referência em Entrecampos. Colocou-se a caixa no topo da estação com exposição total ao sol, sem qualquer tipo de sombra, e o facto de a caixa ser de cor preta piorou ainda mais a situação porque absorveu a radiação nela incidente, causando um aumento de temperatura no seu interior, daí os valores irreais de temperatura medidos pelo sensor. O ideal será ter dois sensores um mais no exterior para funcionar como estação climática do local e outro dentro da caixa para ter a certeza de que não há sobreaquecimento lá dentro.

Numa implementação exterior do protótipo dever-se-á colocá-lo à sombra de modo a evitar o sobreaquecimento dos sensores, o que poderá afectar as medições de O_3 e NO_2 .

Em relação aos sensores comprados para esta dissertação, as expectativas referentes aos seus desempenhos não eram as mais favoráveis, por diversas razões. Não só pelo facto de o preço dos sensores ser extremamente *low cost*, como também ter sido encontrado *online* informações muito dúbias no que diz respeito a fichas técnicas e métodos de operação dos mesmos. Aliado a isto estão os problemas todos que foram surgindo durante a fase da montagem e posteriormente nas primeiras experiências com o protótipo a funcionar. Nos resultados foram realizadas várias correlações quer para o sensor de ozono quer para o sensor de dióxido de azoto com o intuito de obter uma expressão que pudesse transformar os valores de tensão obtidos pelos sensores *low cost* em valores de unidades utilizadas nas medições de qualidade do ar, $\mu g/m^3$. Fez-se correlações através de vários conjuntos de dados, os instantâneos, diários e médias horárias, este último foi realizado de modo a perceber se a estação *low cost* pode ser utilizada

para medir os limites máximos impostos pela OMS. Em todas as correlações o R^2 era demasiado baixo para ser possível apresentar uma expressão que nos desse garantias que ao inserir os valores de tensão de voltagem obteríamos valores aproximadamente correctos em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A conclusão final referente aos sensores é que para medir quantitativamente estes sensores não são os mais indicados, principalmente o MICS-4514, pois os valores medidos pela estação de referência em Entrecampos não coincidem com o intervalo de detecção da concentração de NO_2 como se referiu no capítulo referente aos resultados, isto é, o sensor não consegue captar a concentração de dióxido de azoto presente no ar. Quanto ao MQ-131, embora o seu intervalo de detecção de ozono coincida com a média dos valores medidos pela estação de referência, não consegue captar concentrações inferiores a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como demonstrado no capítulo 4. Apesar do sensor não medir com precisão a concentração correcta do poluente no ar, este serve se for apenas para detectar variações na qualidade do ar, ou seja, se aumenta ou diminui a concentração de ozono.

É preciso ter em conta que o protótipo esteve apenas 9 dias (216 horas, 864 valores para cada sensor) a recolher informação junto da estação de referência nacional em Entrecampos, o que numa campanha de monitorização acaba por ser um período bastante curto para uma experiência científica. Num próximo trabalho a sugestão é a realização de mais campanhas de monitorização ou caso não seja possível a concretização de várias campanhas, que se aumente o tempo de duração, pois assim irá ser possível extrair mais dados para analisar.

Anexos

Anexo A

```
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>
#include <DS1307RTC.h>
#include <SPI.h> //for the SD card module
#include <SD.h> // for the SD card
#include <DHT.h> // for the DHT sensor

#define DHTPIN 2 //Definir os pins
#define PRE_PIN 3
#define VNOX_PIN A2
#define VRED_PIN A3
#define MQ_131_PIN A0
#define DHTTYPE DHT22

char timeStamp [10];
char dateStamp [10];
File dataFile;

void myDelay(unsigned long ms , unsigned long startMillis);
const long dataLength = 59;
const unsigned long measureInterval = 1000;
unsigned long startMillis;
long id = 1;

float loggingTemperature();
float loggingHumidity();
float loggingNO2();
float loggingO3();
float logging2O3();

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

const int CS_pin = 4;
int SDPIN = 8;

void setup() {

  Serial . begin (9600) ;
  Serial . println (" Initializing Card") ;
  pinMode(CS_pin , OUTPUT) ;

  //initializing the DHT sensor
  dht.begin();

  //Setup preheater pin
  pinMode(PRE_PIN, OUTPUT);

  pinMode(SDPIN, OUTPUT) ;
  digitalWrite (SDPIN, HIGH) ;
  if (!SD. begin (CS_pin) )
  {
    Serial . println ("Card Failure ") ;
    return ; }
}
```

```

Serial.println ("Card Ready");
File dataFile = SD.open("LOG.csv" , FILE_WRITE);
if ( dataFile )
{
    dataFile.println (",,," ); //Uma linha em branco para separar sets de dados diferentes
    String header = "Hora , Data , Temperatura ,Humidade , NO2, O3" ;
    dataFile.println ( header );
    dataFile.close ();
    Serial.println ( header );
}
else {
    Serial.println ("Couldn ' t open log file " );
}
}

void loop() {

float SomaTemperatura = 0;
float MediaTemperatura = 0;
float SomaHumidade = 0;
float MediaHumidade = 0;
float SomaNO2 = 0;
float MediaNO2 = 0;
float SomaO3 = 0;
float MediaO3 = 0;
float SomaO3_ = 0;
float MediaO3_ = 0;
String dataString;

tmElements_t tm; // iniciar comandos RTC, ele vai buscar DATA e Hora atraves do comando "tm"

startMillis = millis ();

    for (int i = 0; i < dataLength; i++){

        loggingTemperature();
        loggingHumidity();
        loggingNO2();
        loggingO3();
        logging2O3();

        SomaTemperatura += loggingTemperature();
        SomaHumidade += loggingHumidity();
        SomaNO2 += loggingNO2();
        SomaO3 += loggingO3();
        SomaO3_ += logging2O3 ();

        myDelay(1000, startMillis); //call à funcao mydelay
        startMillis = millis(); //dá lhe um novo milis para no ciclo a seguir comparar esse e ver se já passou 1000ms
    }

    MediaTemperatura = SomaTemperatura / dataLength;
    MediaHumidade = SomaHumidade / dataLength;
    MediaNO2 = SomaNO2 / dataLength;
    MediaO3 = SomaO3 / dataLength;
    MediaO3_ = SomaO3_ / dataLength;

    if (RTC.read (tm)) {
        sprintf (timeStamp , "%02d:%02d:%02d" , tm.Hour , tm. Minute , tm. Second );
        //Serial.println (timeStamp) ;
        sprintf (dateStamp , "%2d/%2d/%2d" , tm.Day, tm.Month , tm. Year) ;
    }

```

```

//Serial . println ( dateStamp ) ;
}

dataString = String(timeStamp) + "," + String(dateStamp) + "," + String(MediaTemperatura) + "," +
String(MediaHumidade) + "," + String(MediaNO2) + "," + String(MediaO3) + "," + String(MediaO3_);

File dataFile = SD.open("LOG.csv" , FILE_WRITE) ;
if ( dataFile )
{
    dataFile . println ( dataString ) ;
    dataFile . close () ;
    Serial . println ( dataString ) ;
}
else
{
    Serial . println ("Couldn ' t open log file ") ;
}
id++;
dataFile . close () ;
}

float loggingTemperature() { // Medições de Temperatura
float Temperatura = 0;
Temperatura = dht.readTemperature();
return (Temperatura);
}

float loggingHumidity() { // Medições de Humidade
float Humidade = 0;
Humidade = dht.readHumidity();
return (Humidade);
}

float loggingNO2() { // Medições de NO2
float ValorNO2 = 0;
ValorNO2 = analogRead(A2)* (5.0 / 1023.0);
return (ValorNO2);
}

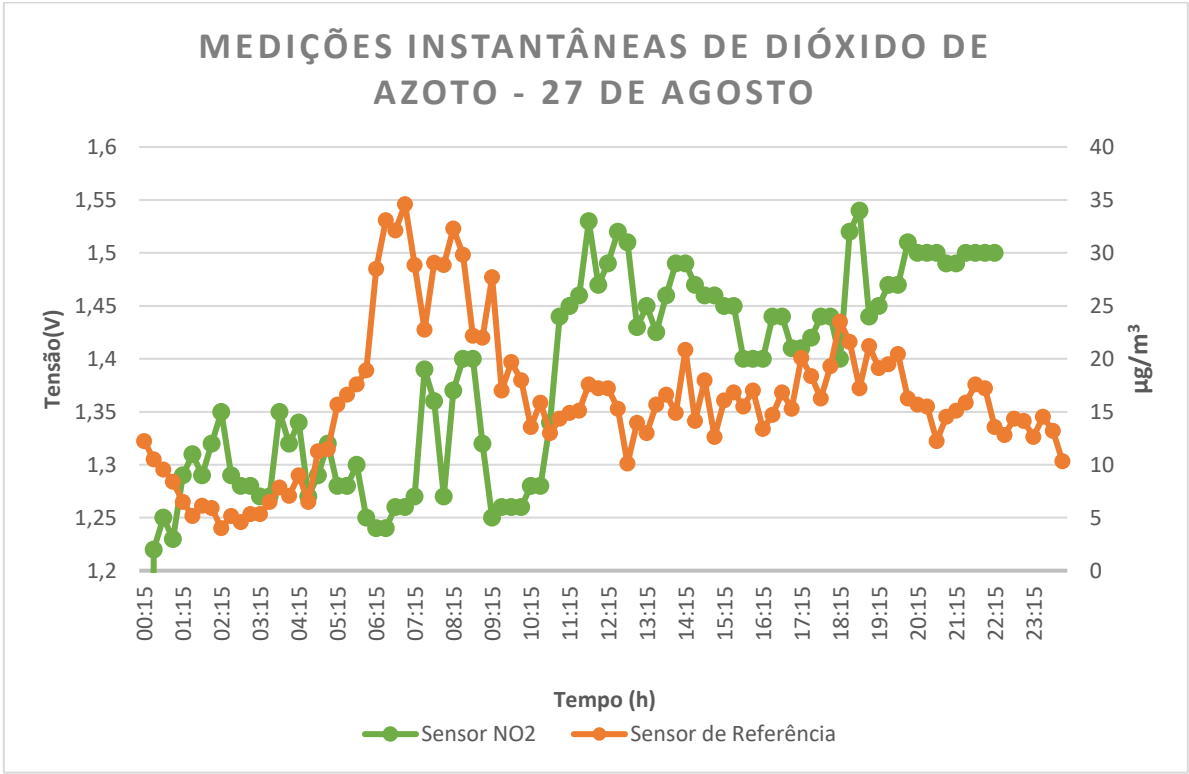
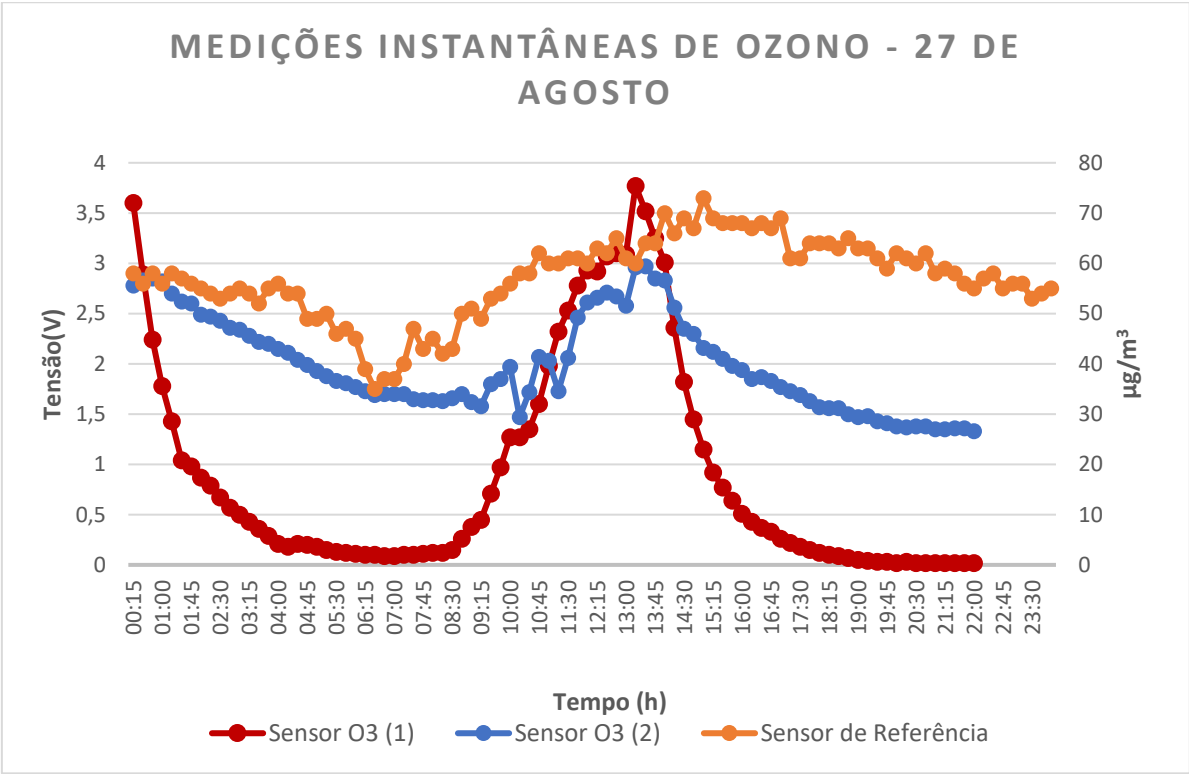
float loggingO3() { //Medições de O3
float ValorO3 = 0;
ValorO3 = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
return (ValorO3);
}

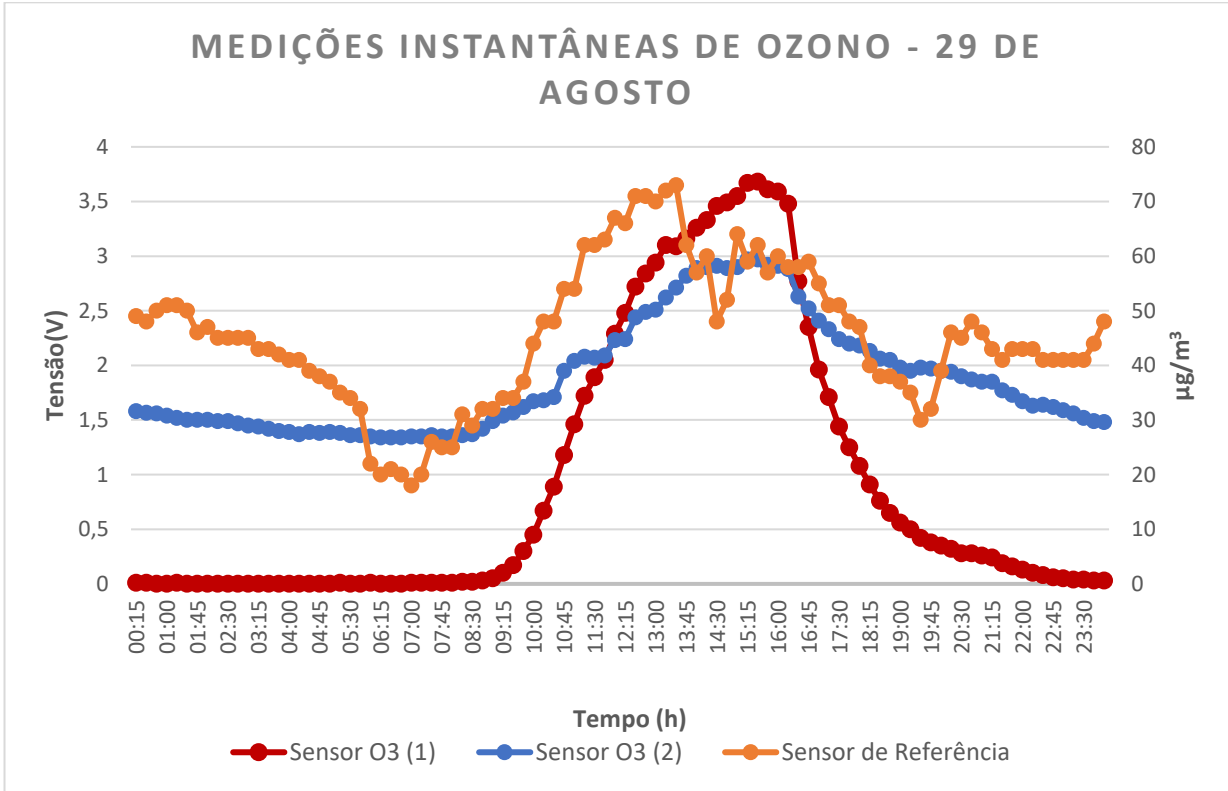
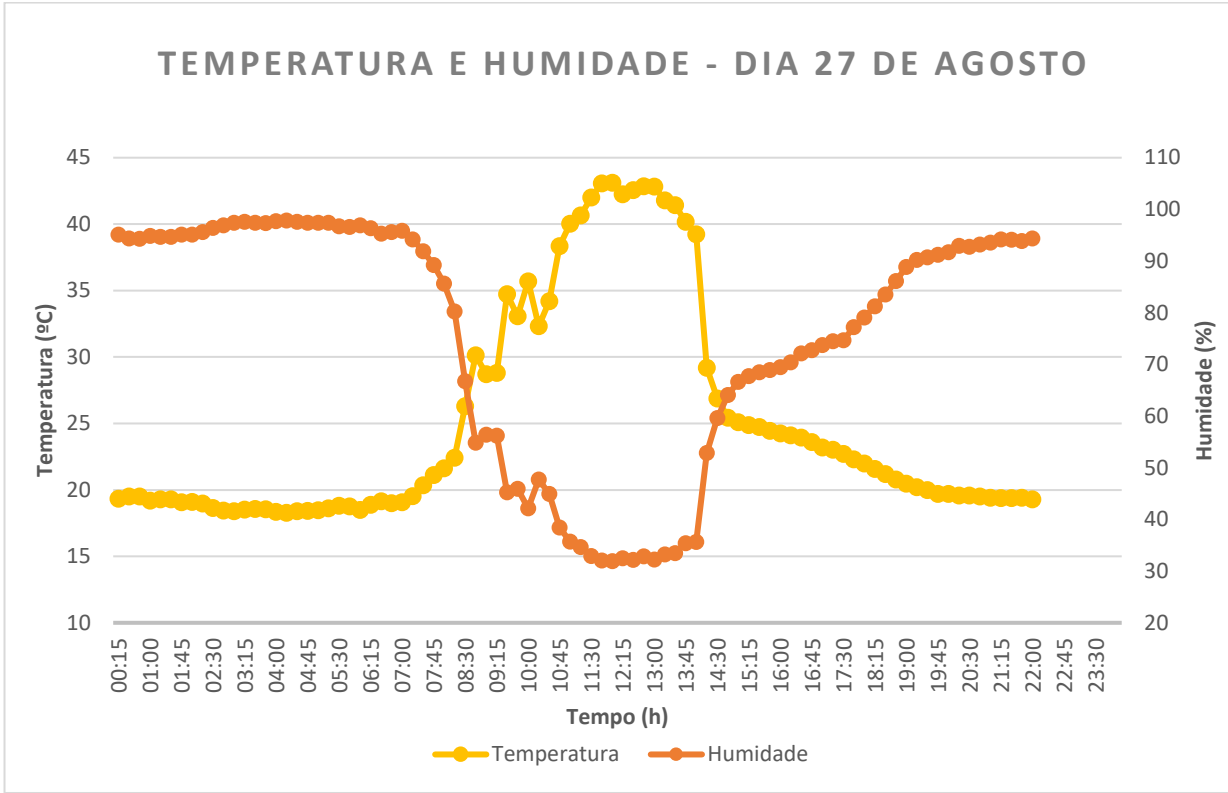
float logging2O3() { //Medições de O3
float ValorO3_ = 0;
ValorO3_ = analogRead(A1)*(5.0 / 1023.0);
return (ValorO3_);
}

void myDelay(unsigned long ms, unsigned long startMillis) { // ms: duration
    unsigned long start = startMillis;
    for (;;) {
        unsigned long now = millis(); // timestamps the now
        unsigned long elapsed = now - start; // elapsed time since the initial now timestamp
        if (elapsed >= ms) // comparing durations: OK
            return;
    }
}

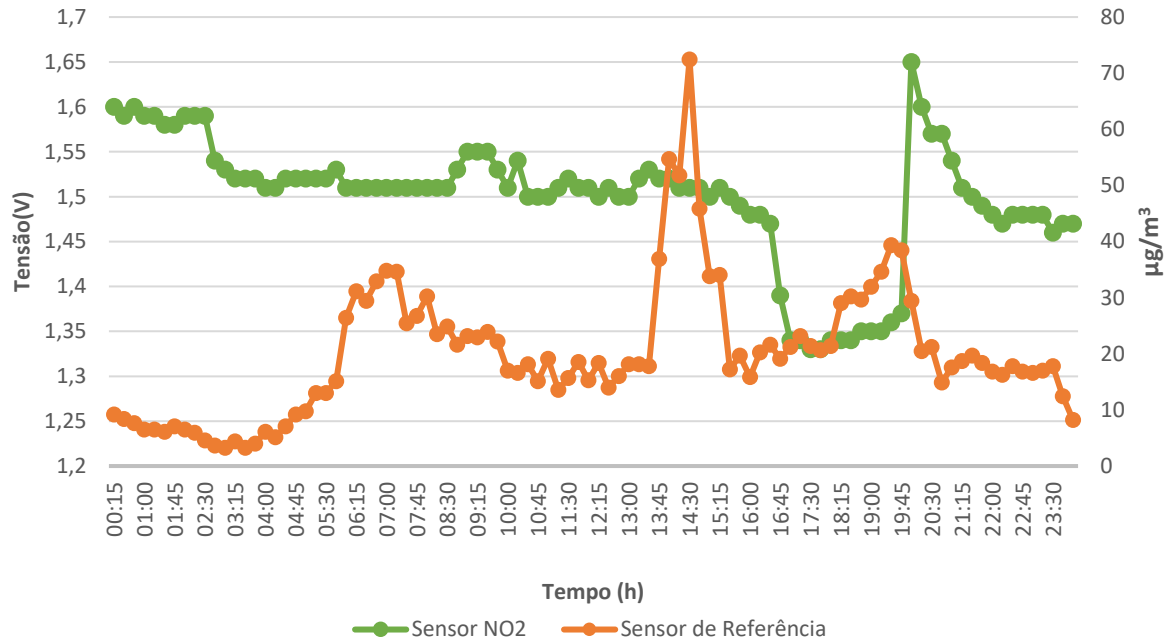
```

Anexo B

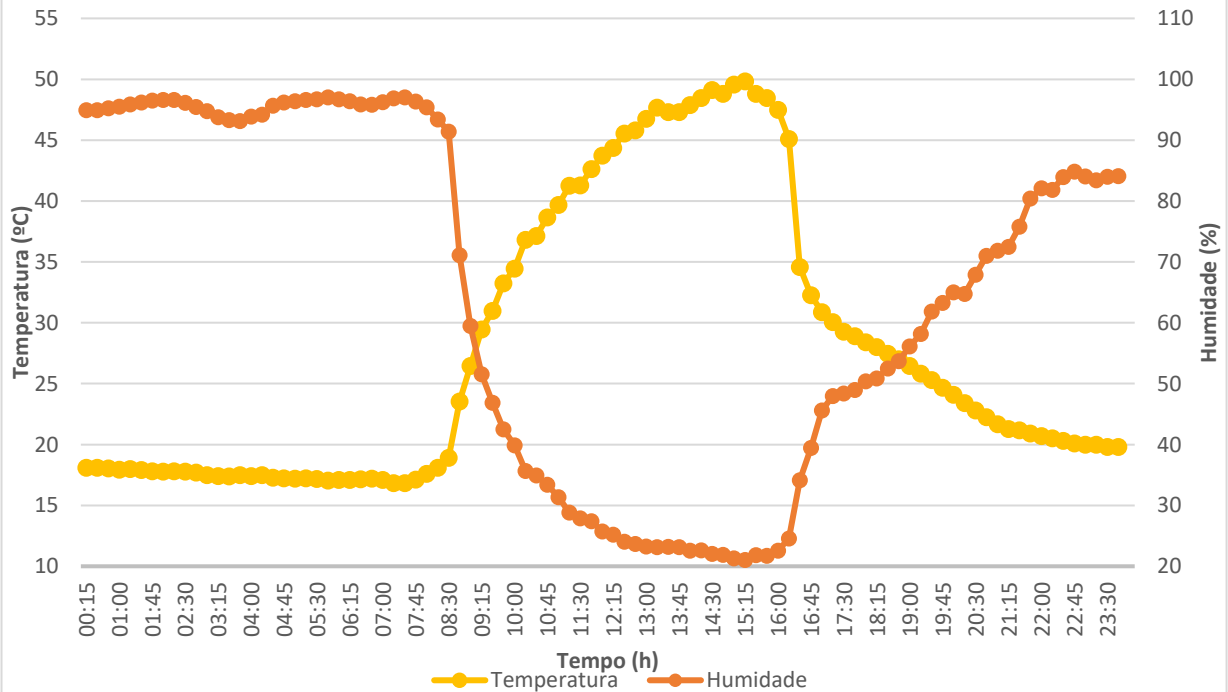




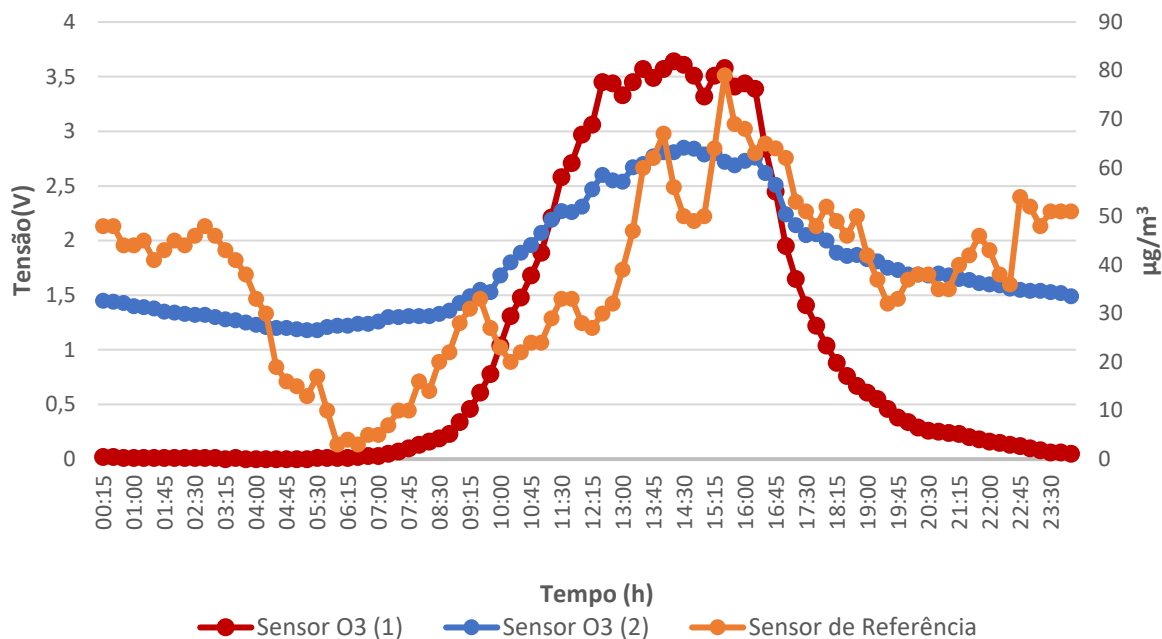
MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 29 DE AGOSTO



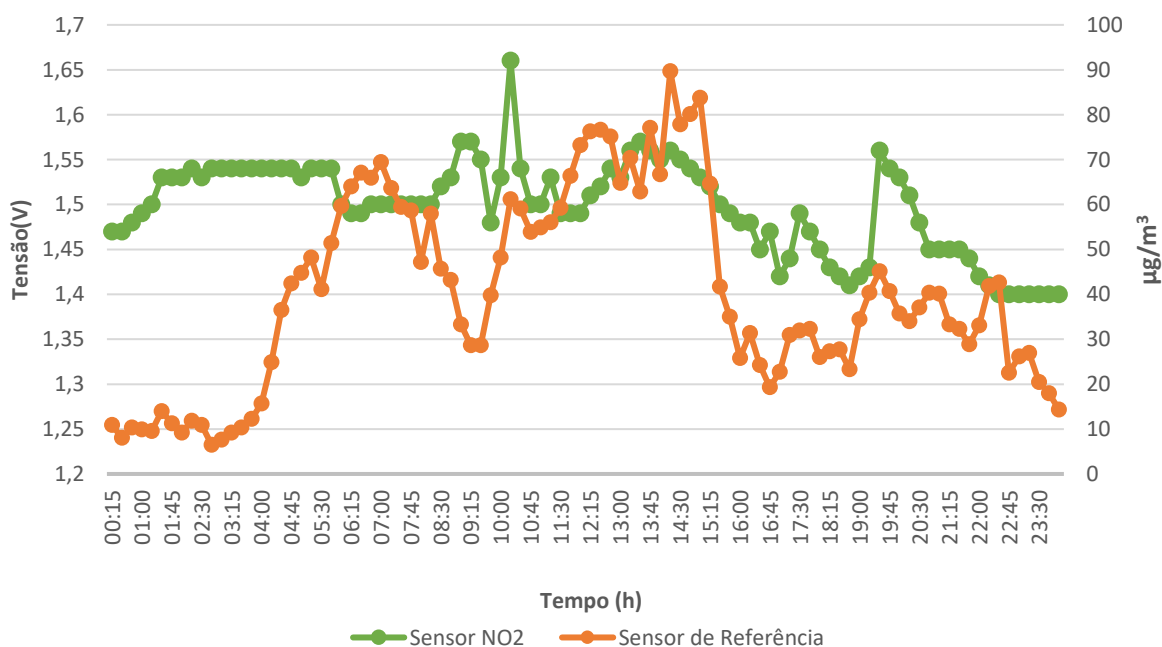
TEMPERATURA E HUMIDADE - DIA 29 DE AGOSTO

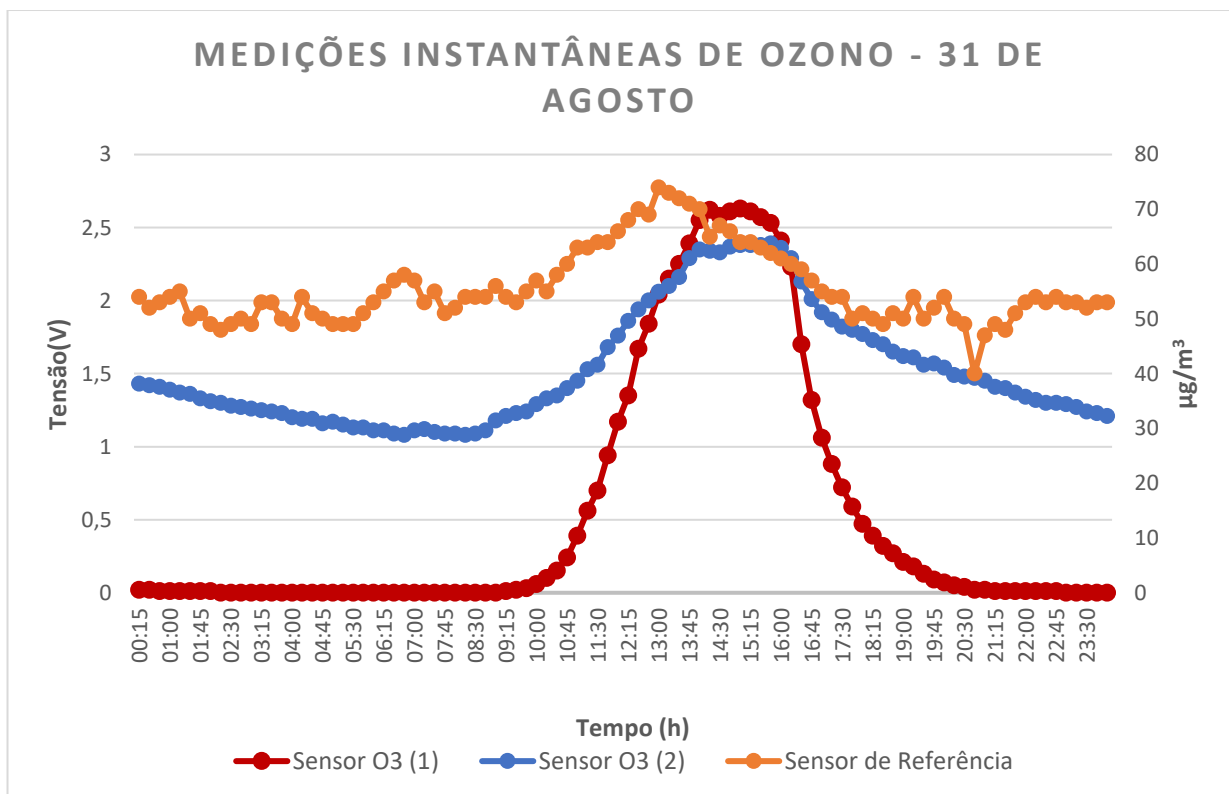
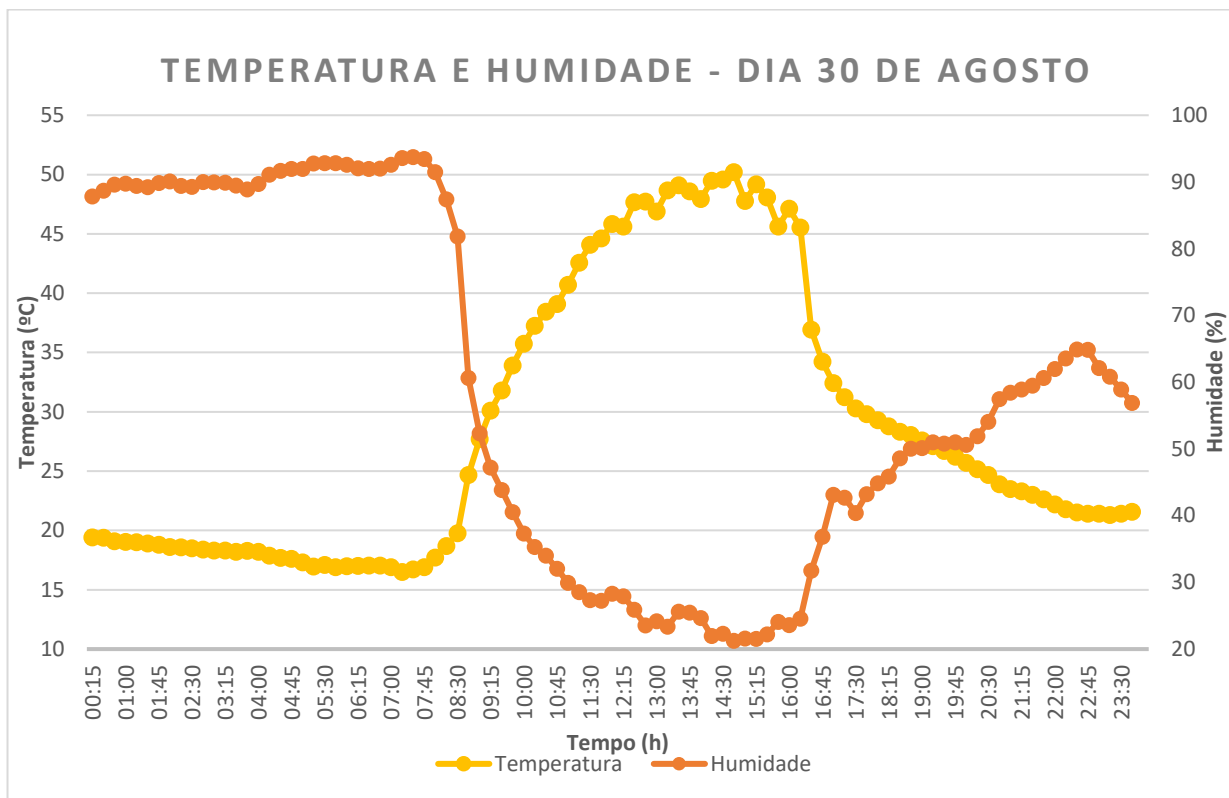


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE OZONO - 30 DE AGOSTO

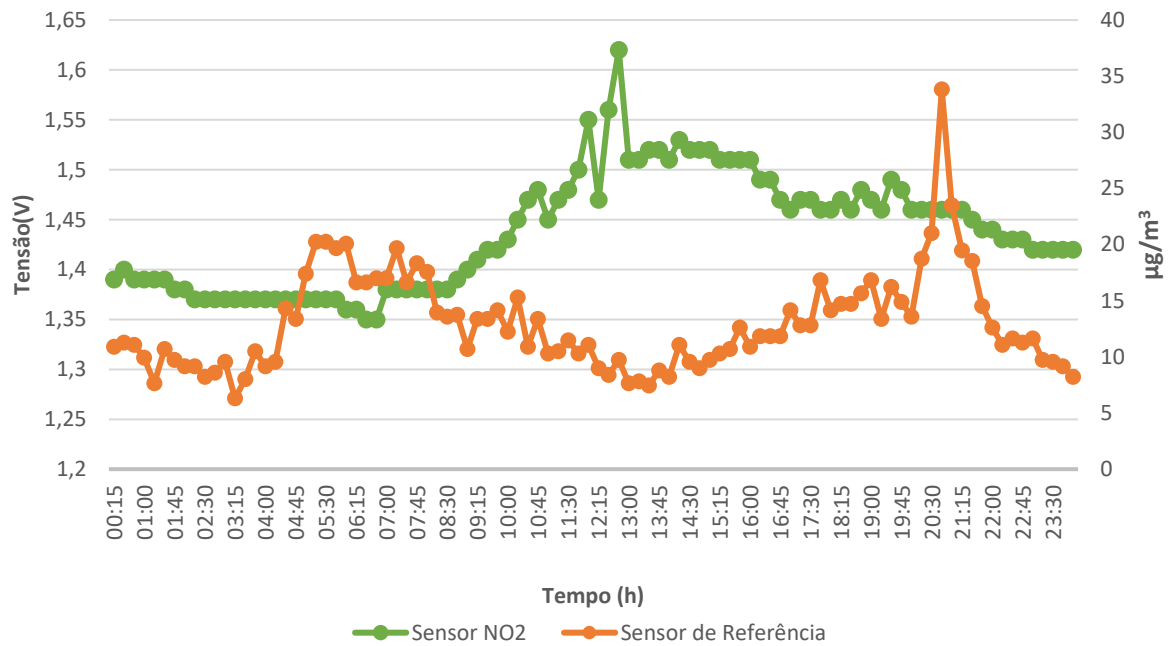


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 30 DE AGOSTO

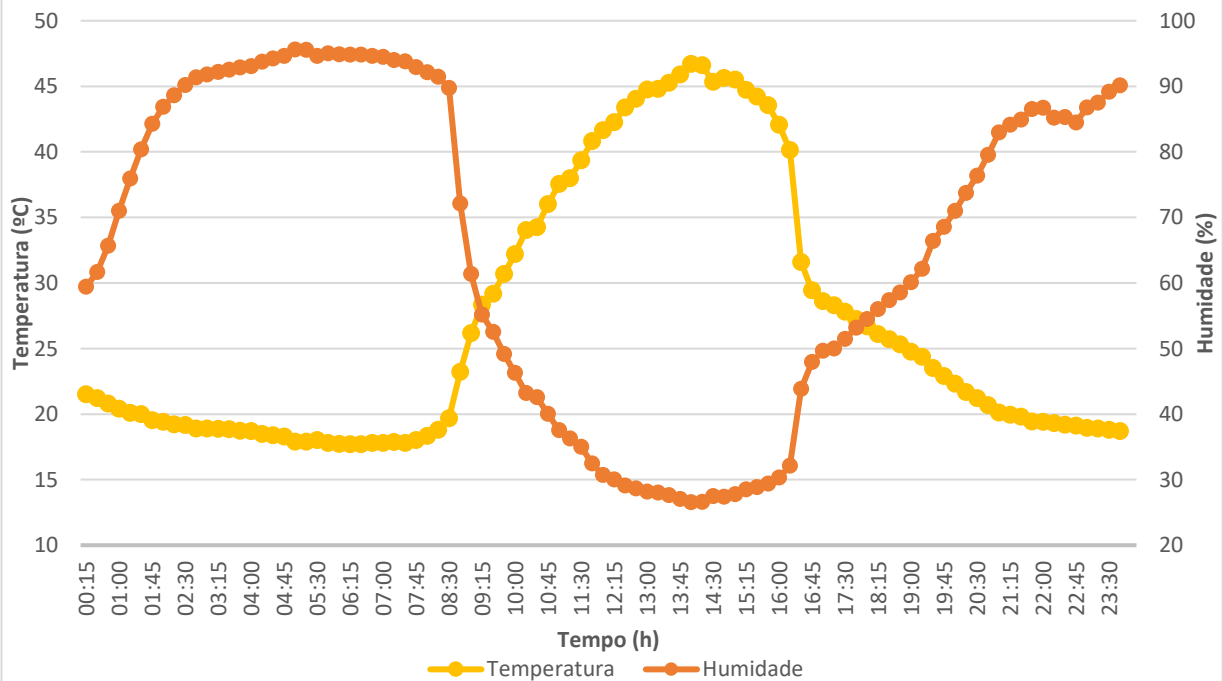




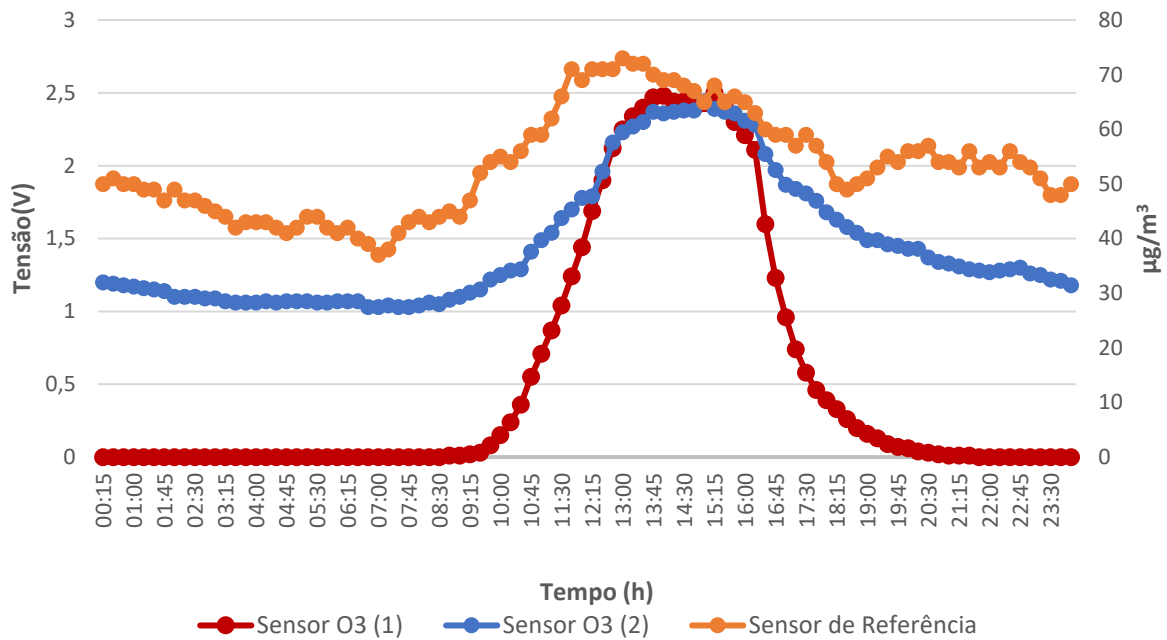
MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 31 DE AGOSTO



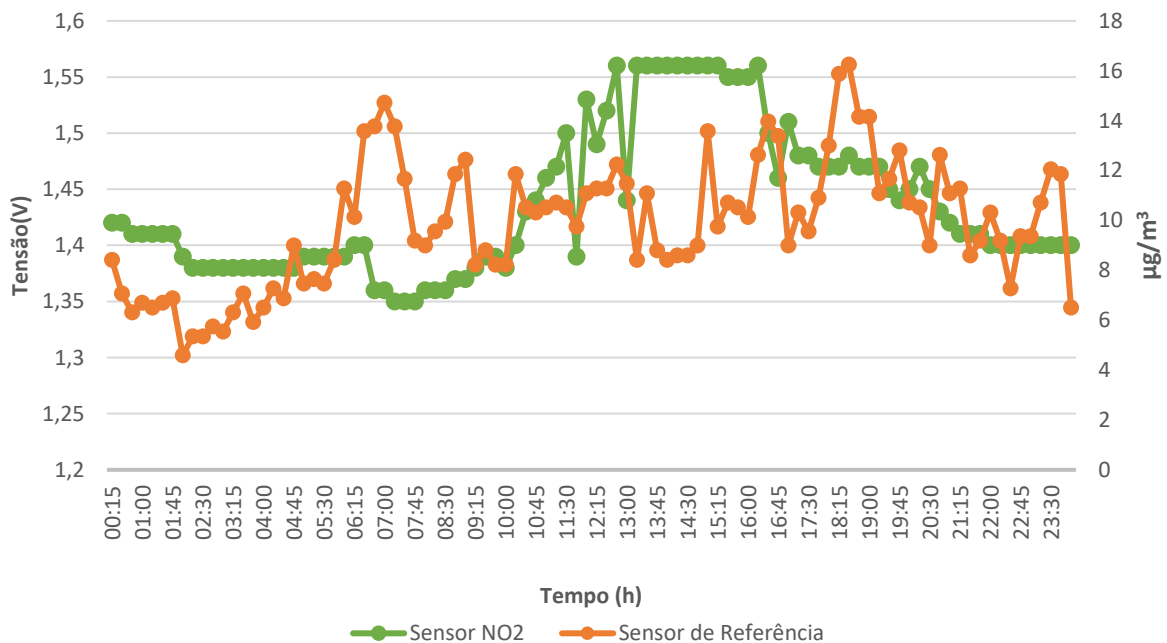
TEMPERATURA E HUMIDADE - DIA 31 DE AGOSTO

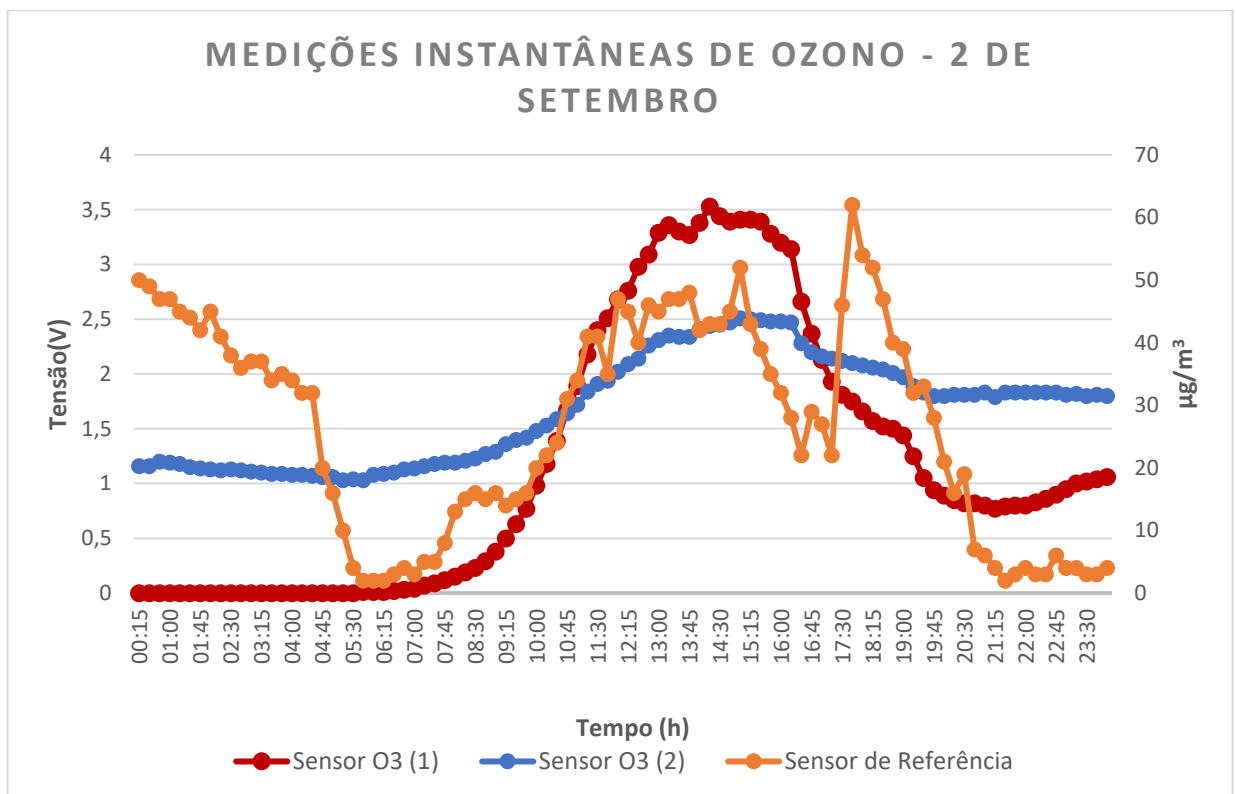
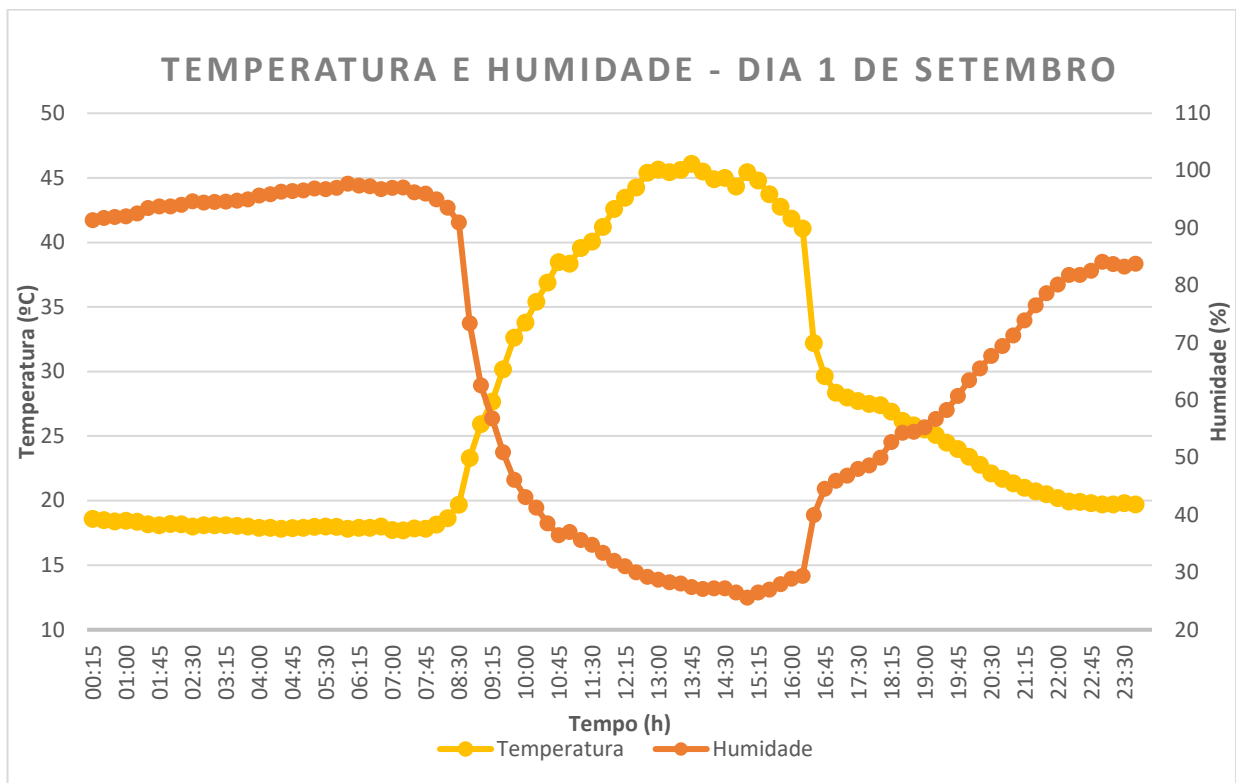


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE OZONO - 1 DE SETEMBRO

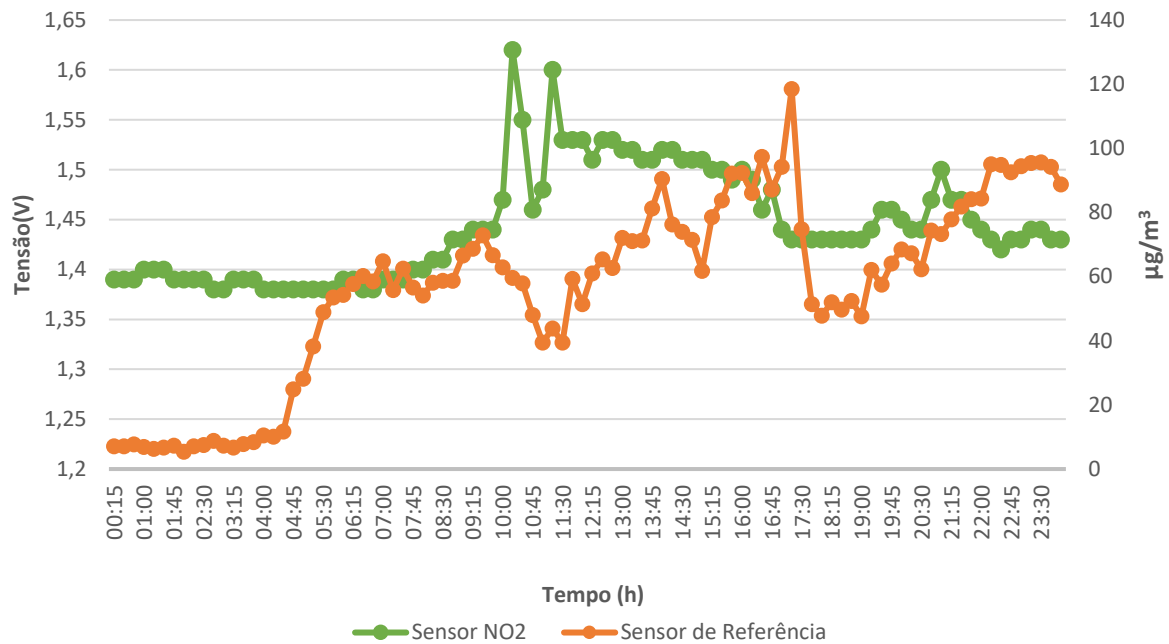


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 1 DE SETEMBRO

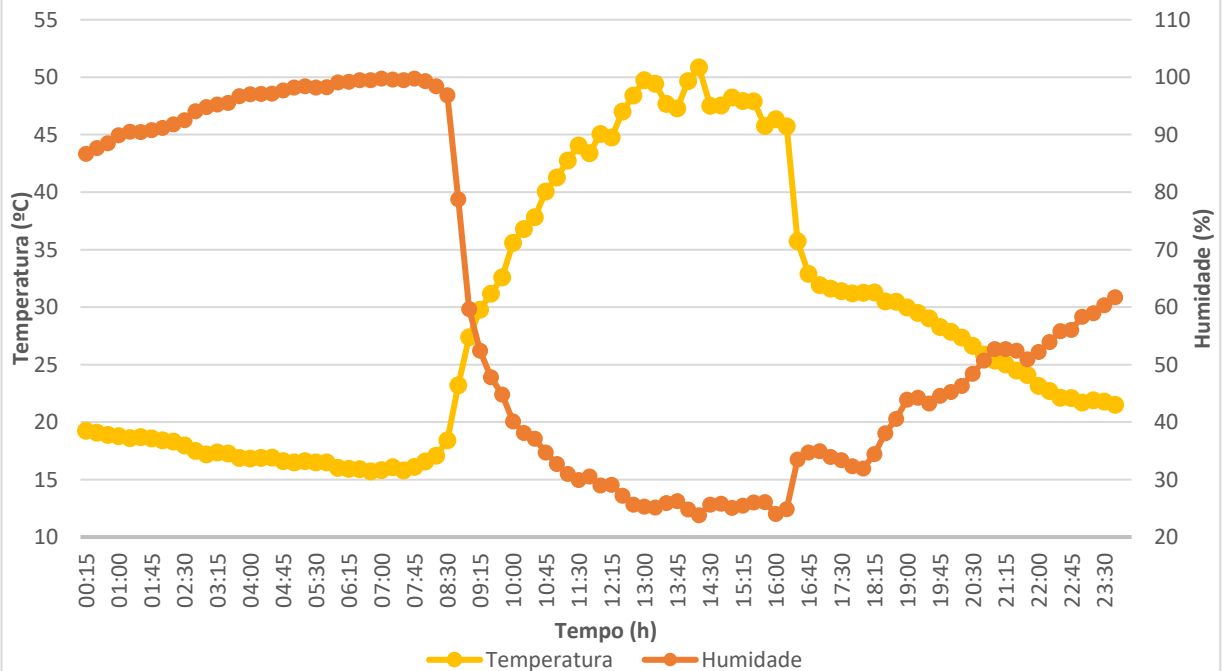




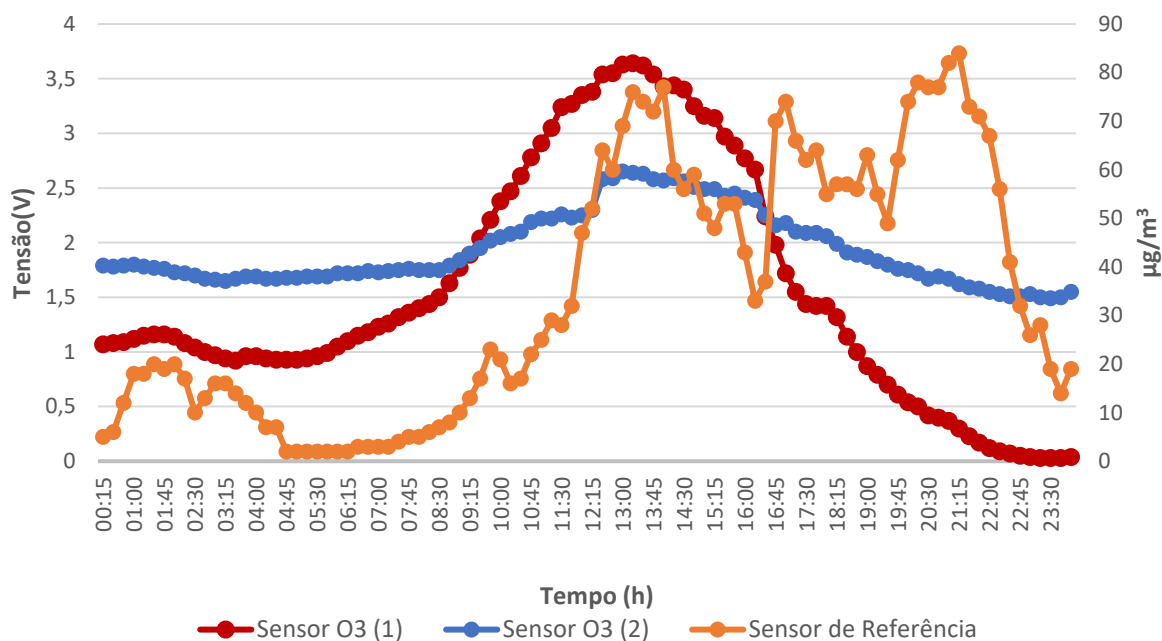
MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 2 DE SETEMBRO



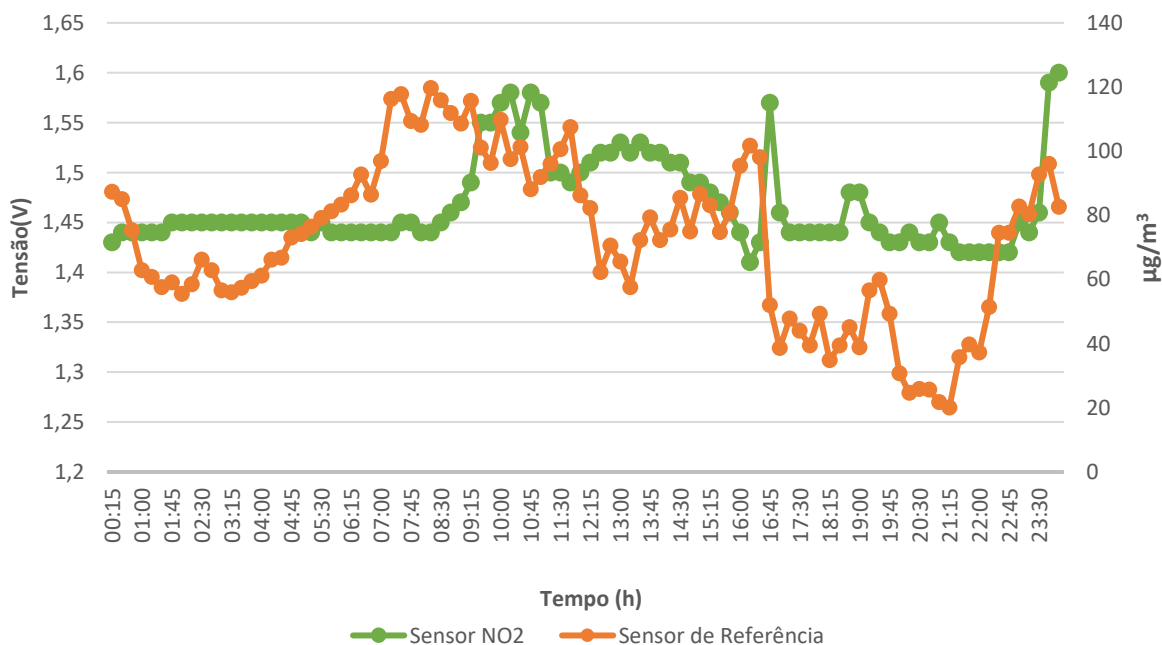
TEMPERATURA E HUMIDADE - DIA 2 DE SETEMBRO

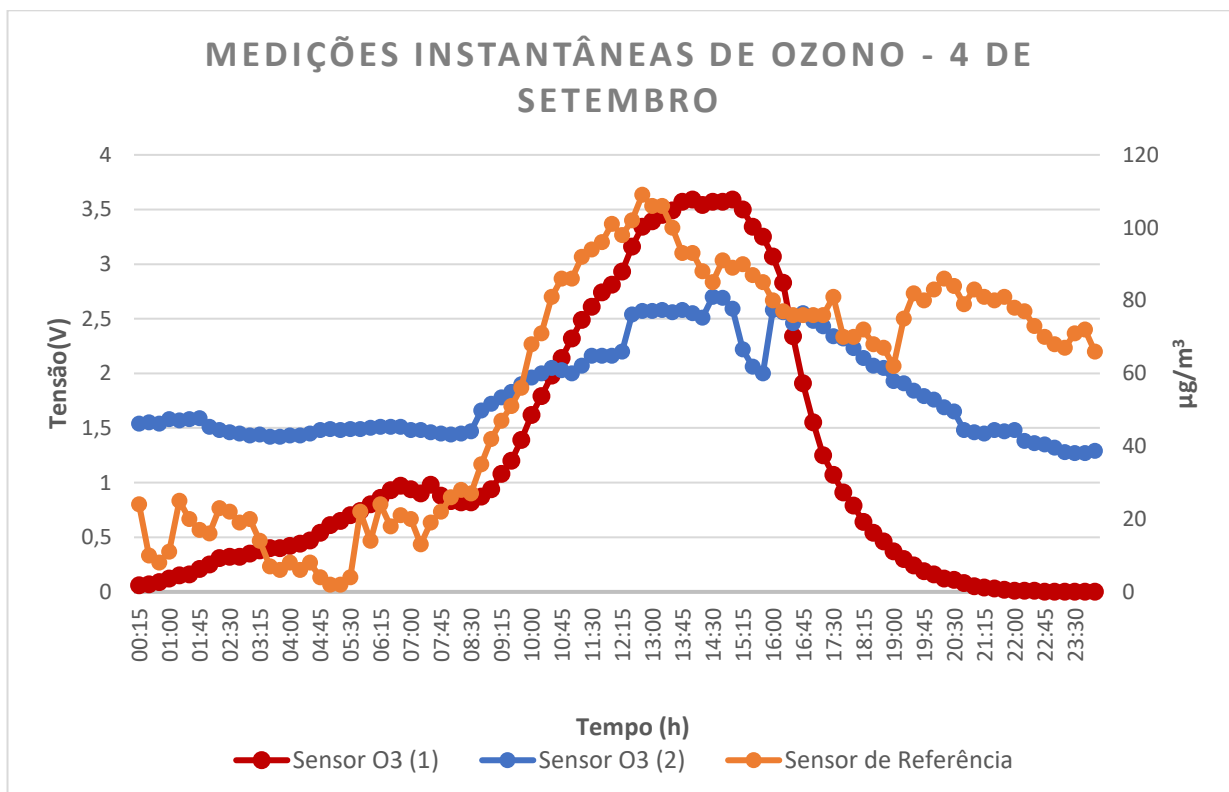
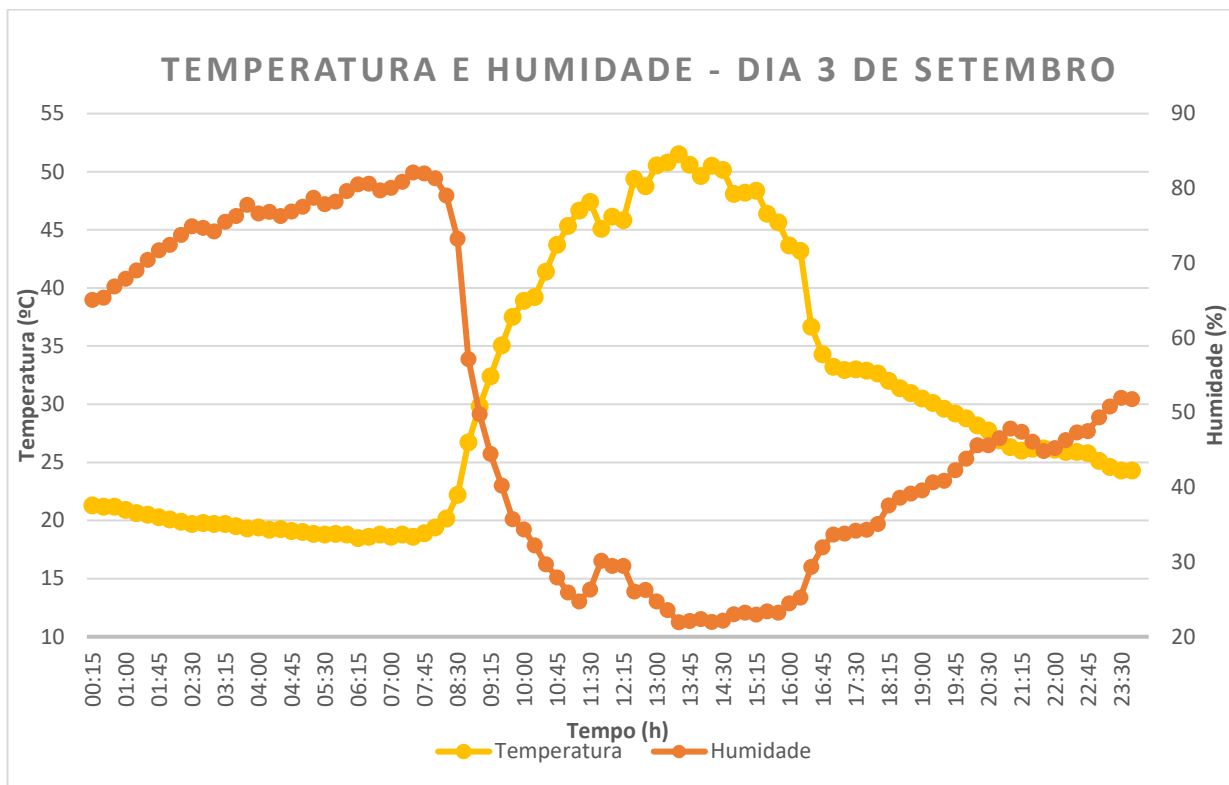


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE OZONO - 3 DE SETEMBRO

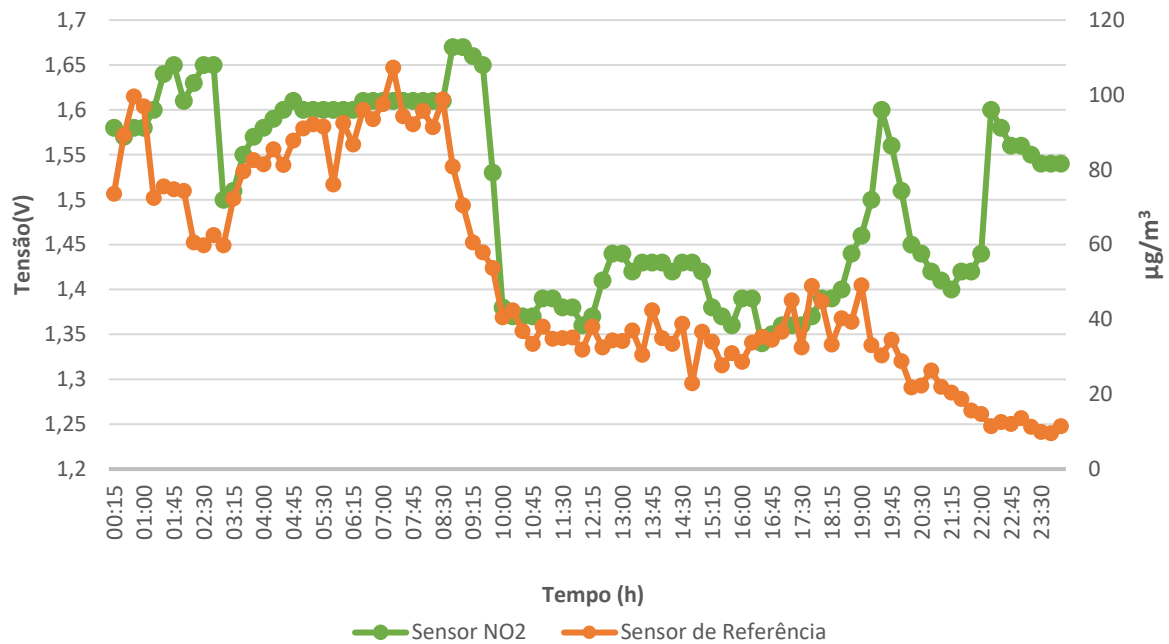


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 3 DE SETEMBRO

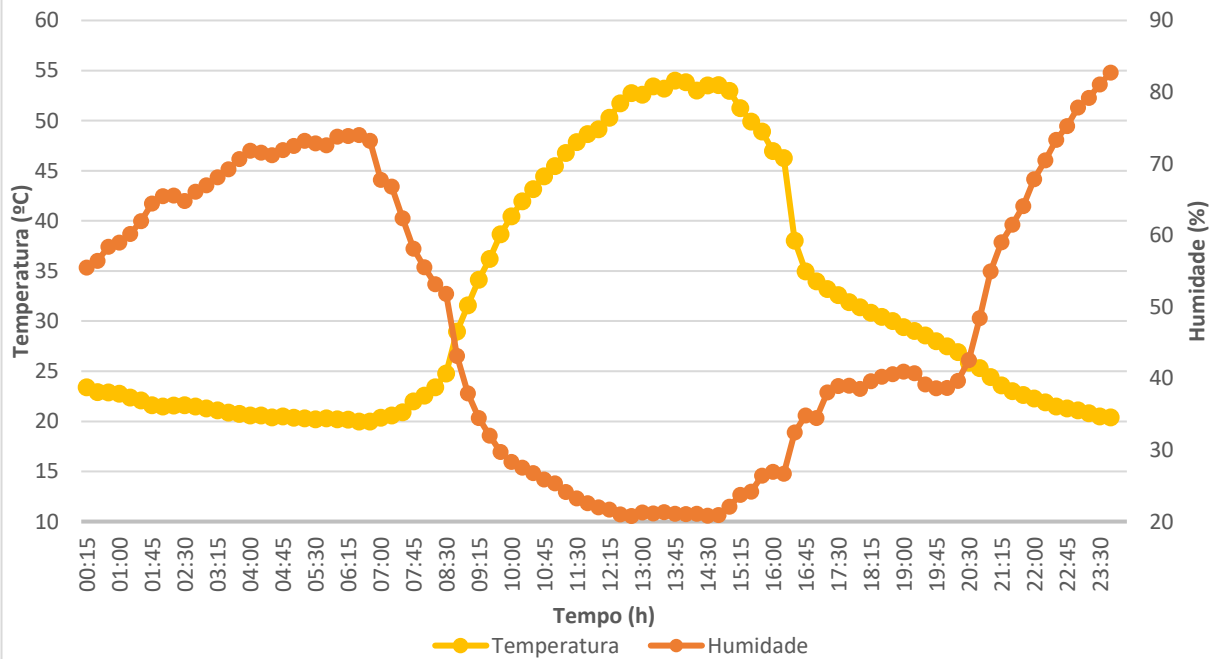




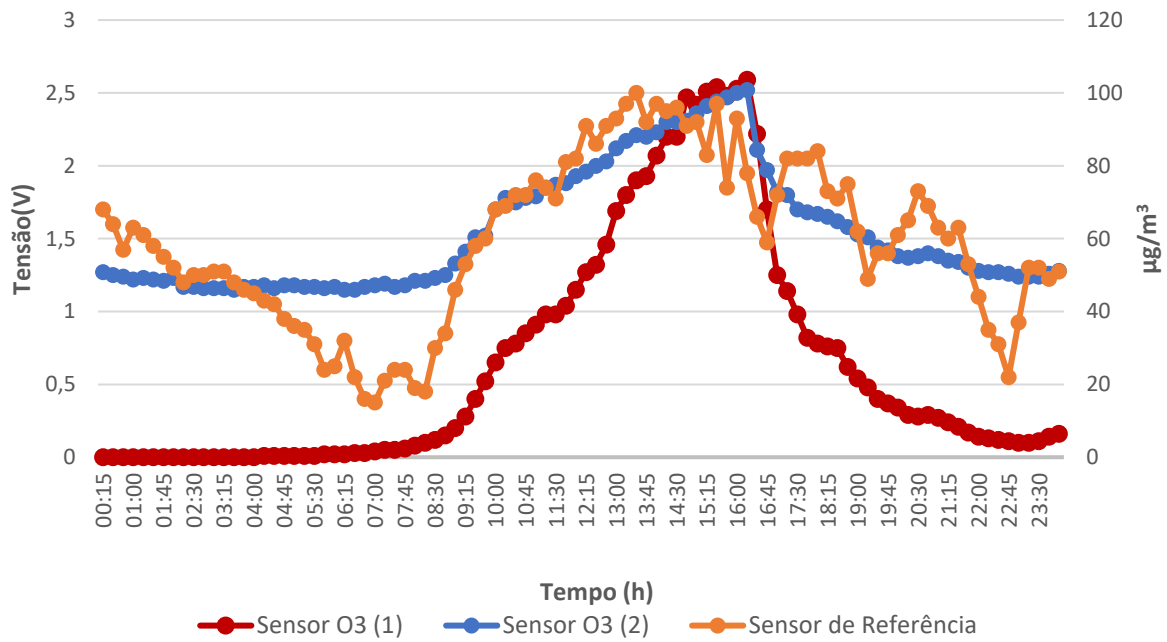
MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 4 DE SETEMBRO



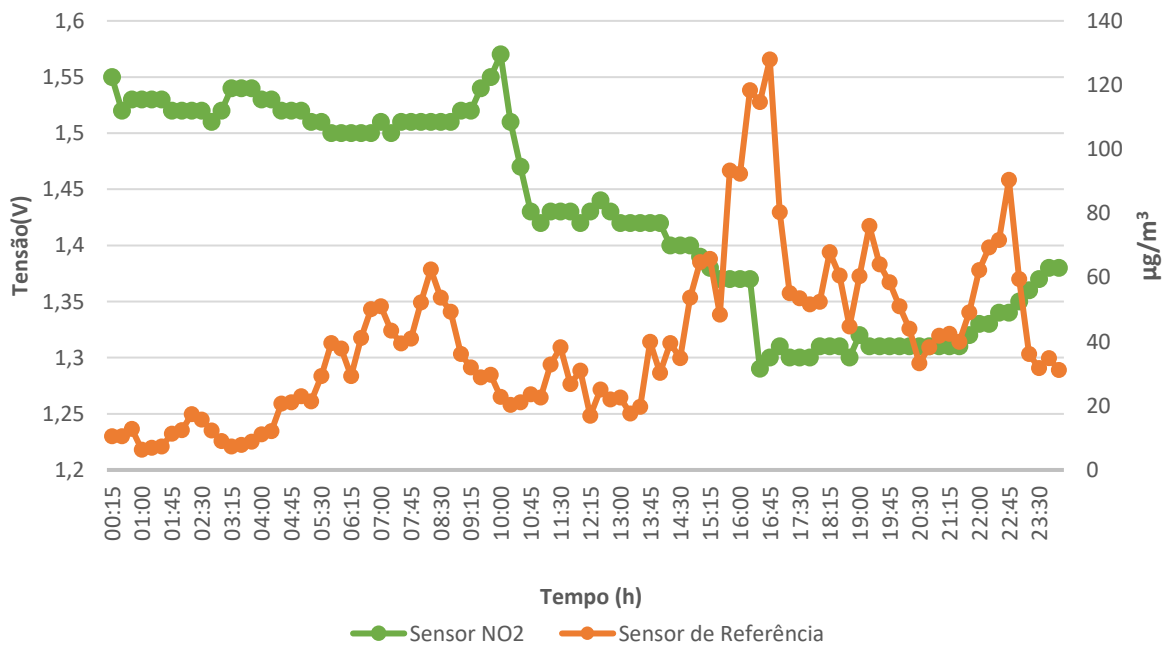
TEMPERATURA E HUMIDADE - DIA 4 DE SETEMBRO

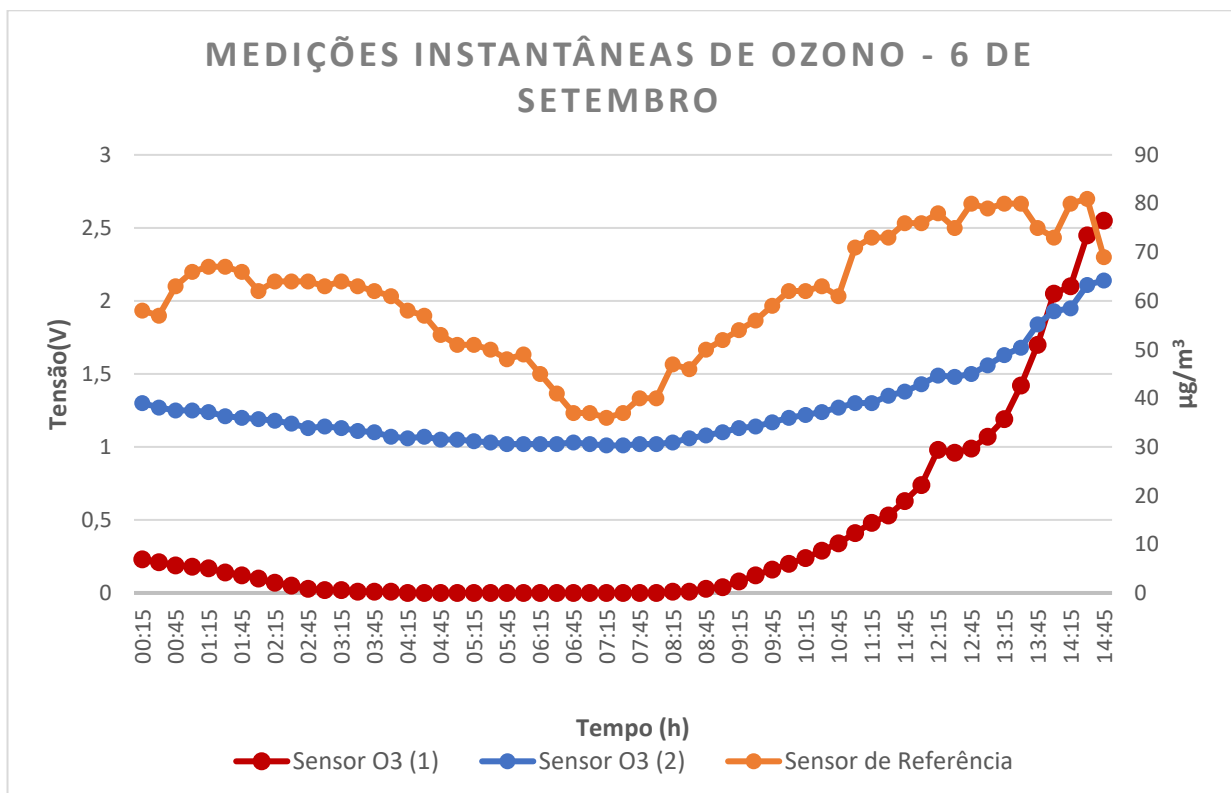
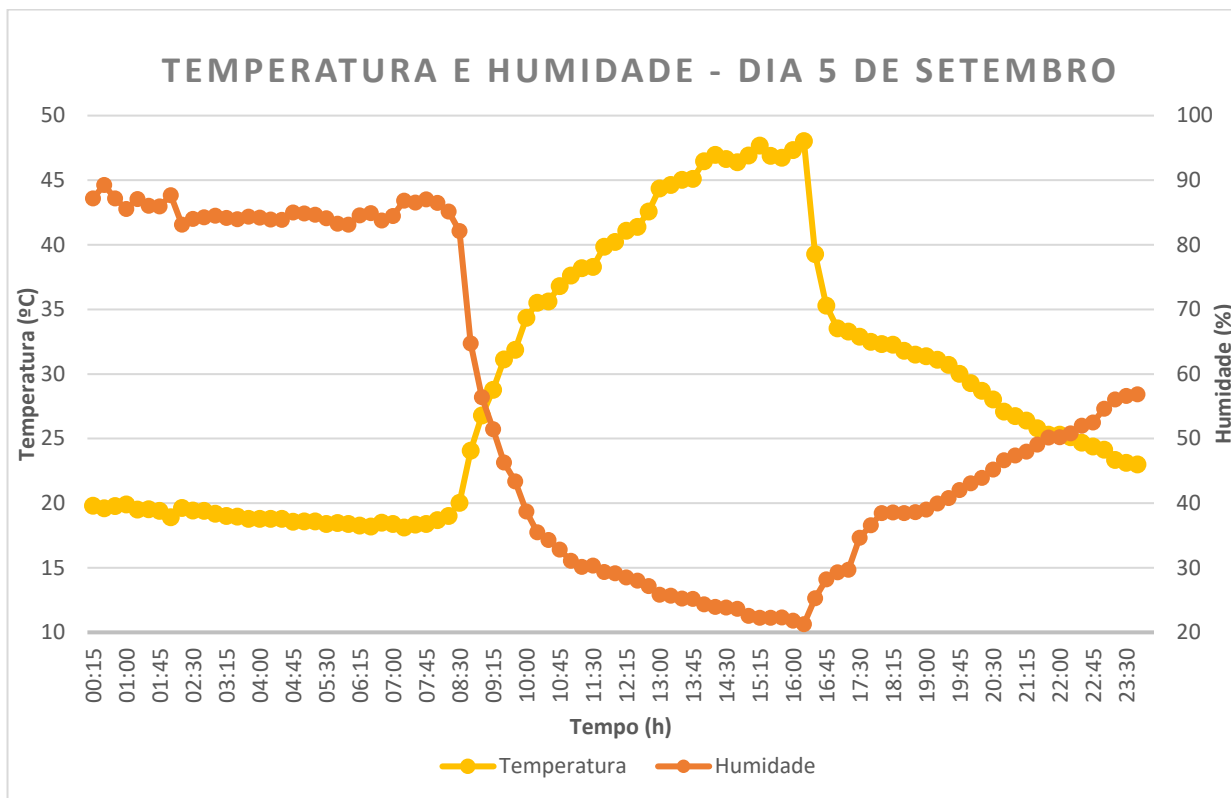


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE OZONO - 5 DE SETEMBRO

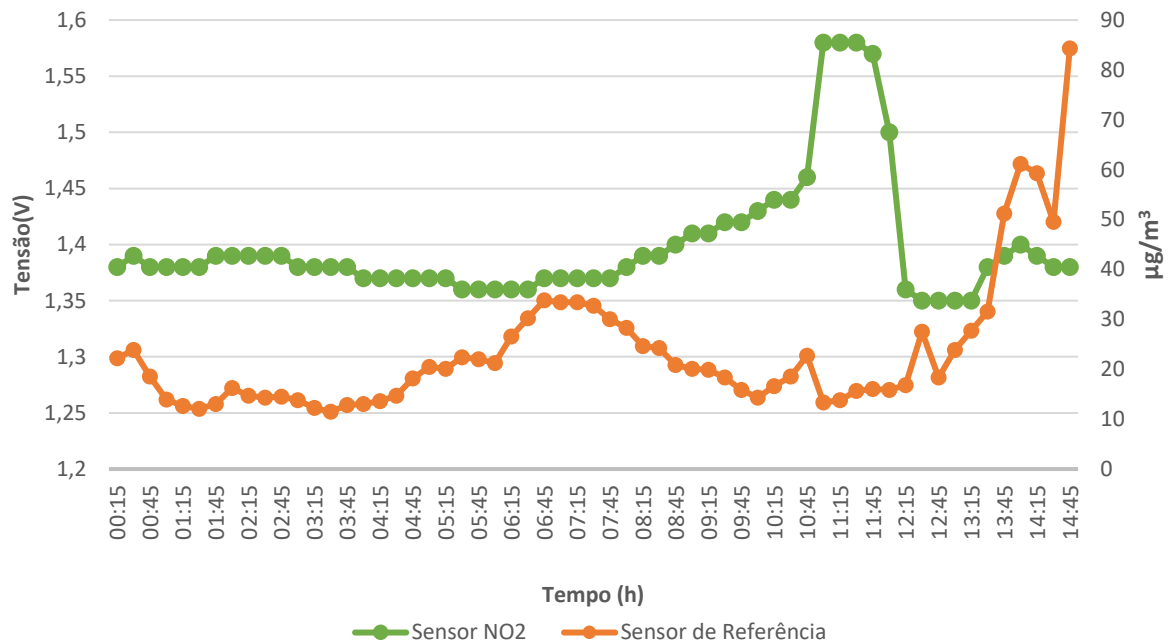


MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 5 DE SETEMBRO

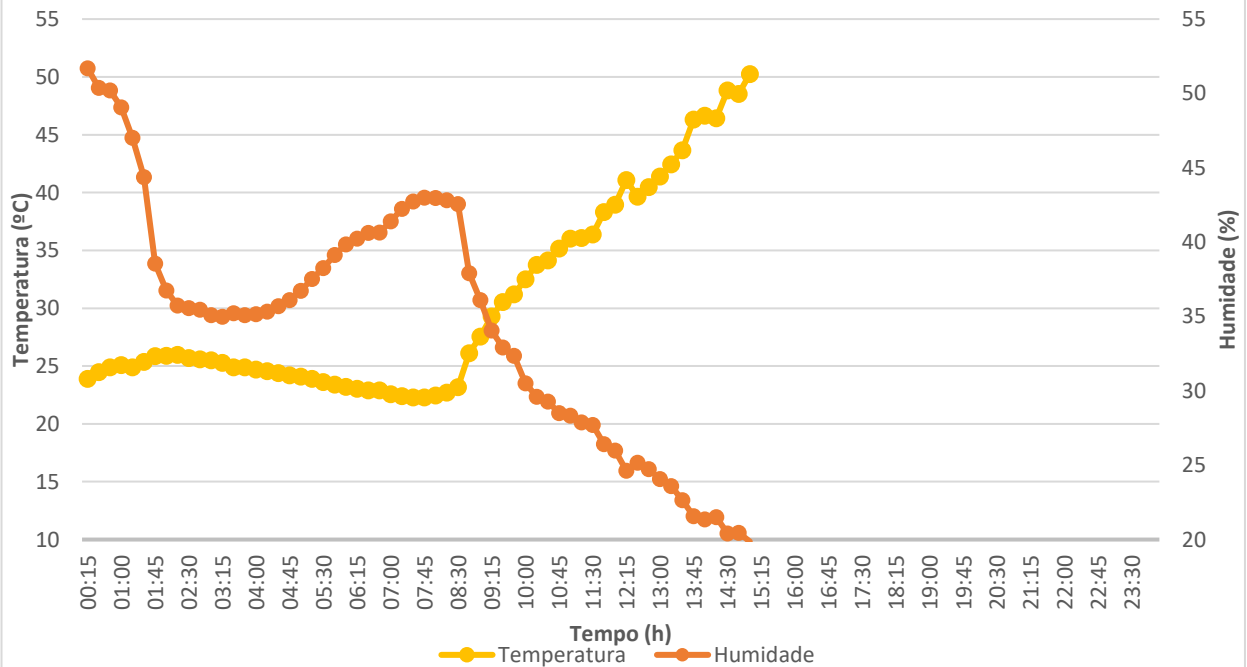




MEDIÇÕES INSTANTÂNEAS DE DIÓXIDO DE AZOTO - 6 DE SETEMBRO



TEMPERATURA E HUMIDADE - DIA 6 DE SETEMBRO



Referências

- [1] Clean Air, European Commission. URL: http://ec.europa.eu/environment/air/index_en.htm - Acedido a 30/05/2019
- [2] The Great Smog of 1952. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/case-studies/great-smog> - Acedido a 30/05/2019
- [3] Organização Mundial da Saúde. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) – Acedido a 30/05/2019
- [4] Índice da Qualidade do Ar – Qualar. URL: <https://qualar.apambiente.pt/node/indice-qualar> - Acedido a 29/05/2019
- [5] Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo. URL: <http://www.ccdr-lvt.pt/pt/avaliacao-da-qualidade-do-ar-na-rlvt/8085.htm#Z2> – Acedido a 12/05/2019
- [6] Agência Portuguesa do Ambiente. URL: <https://qualar.apambiente.pt/> - Acedido a 29/05/2019
- [7] Völgyesi, P., Koutsoukos, X. et al. Air Quality Monitoring with SensorMap. *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor network*, Pages 529-530. (2008)
- [8] Hasenfratz, D.; Saukh, O. et al. Participatory Air Pollution Monitoring Using Smartphones. In *Mobile Sensing: From Smartphones and Wearables to Big Data*. (2012)
- [9] Bathiya, B., Srivastava, S. et al. Air pollution monitoring using wireless sensor network, *2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, Pages 112-117 (2016)
- [10] Krupa, S., Manning, W. Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation. *Environmental Pollution*, Volume 50, Issue 1-2, Pages 101-137 (1988)
- [11] Lippmann, M. Health Effects of Ozone a Critical Review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol 39, Issue 5, Pages 672-695 (1989)
- [12] Baukal, C. Everything you need to know about NO_x: Controlling and minimizin pollutant emissions is critical for meeting air quality regulations. *Metal Finishing*, Vol 103, Issue 11, Pages 18-24 (2005)
- [13] Samoli, E., Aga, E. et al. Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality: an analysis within the APHEA project. *European Respiratory Journal*, Vol 53 Issue 2. (2006)
- [14] World Health Organization. Air Quality Guidelines. Global Update 2005 (2006)
- [15] Decreto-Lei nº 102/2010 de 23 de Setembro de 2010. *Diário da República*, nº186/2010 - 1.^a série. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa
- [16] Wang, C., Yin, L., Zhang, L. et al. Metal Oxide Gas Sensor: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*, Volume 10, Issue 3, Pages 2088-2106. (2010)
- [17] Li, Z., Li, H., Wu, Z. et al. Advances in designs and mechanisms of semiconducting metal oxide nanostructures for high-precision gas sensors operated at room temperature. *Materials Horizons*, Vol 6, Issue 3, Pages 470-506. (2019)

- [18] The Semiconductor gas sensing technique. URL: <https://www.edaphic.com.au/gas-detection-encyclopedia/semiconductor-sensors/> - Acedido a 15/02/2019
- [19] Li, X., Abraham, S. A Cost-Effective Wireless Sensor Network System for Indoor Air Quality Monitoring Application. *Procedia Computer Science*, Vol 34, Pages 165-171 (2014)
- [20] Dejan Nedelkovski. DHT11 & DHT22 Sensors Temperatura and Humidity Tutorial using Arduino. URL: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/dht11-dht22-sensors-temperature-and-humidity-tutorial-using-arduino/> - Acedido a 11/02/2019
- [21] Device Plus. Arduíno Communication Protocols Tutorial. URL: <https://www.deviceplus.com/how-tos/arduino-guide/arduino-communication-protocols-tutorial/> - Acedido a 11/02/2019
- [22] An Introduction to Arduino Uno Pinout URL: <https://www.circuito.io/blog/arduino-uno-pinout/> - Acedido a 11/02/2019
- [23] Sparkfun. Ficha Técnica Sensor DHT22. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> - Acedido a 11/02/2019
- [24] Arduino MQ Gas sensors URL: <https://playground.arduino.cc/Main/MQGasSensors/> - Acedido a 13/02/2019
- [25] Winsen. Ficha Técnica Sensor MQ-131 (Low Concentration). URL: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/mq131-\(low-concentration\)-ver1_3-manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/mq131-(low-concentration)-ver1_3-manual.pdf) – Acedido a 13/02/2019
- [26] E2V. Ficha Técnica Sensor MICS-4514. URL: <http://files.manylabs.org/datasheets/MICS-4514.pdf> - Acedido a 13/05/2019
- [27] Ângelo Soares, Desenvolvimento e teste de um protótipo móvel com sensores low cost. Tese de mestrado, 2018. URL: <http://hdl.handle.net/10451/35294>
- [28] Histórico do Tempo para Lisboa. URL: <https://www.tempo.pt/lisboa-sactual.htm> - Acedido a 10/10/2019
- [29] Wolff, G., Kahlbaum, D., Heuss, J. The vanishing ozone weekday/weekend effect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol 63, Issue 3, Pages 292-299 (2013)